

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA TEMPÊTE DE VERGLAS DU 24-26 JANVIER 2017 AYANT
CAUSÉ DES PANNES DE COURANT MAJEURES DANS LA PROVINCE DU
NOUVEAU-BRUNSWICK

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

VANESSA MCFADDEN

FÉVRIER 2020

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de recherche, Julie Thériault, de même que Mélissa Cholette et Katja Winger, pour leur immense aide et leur soutien tout au long de cette aventure. Je souhaite également souligner le soutien financier fourni par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), les Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) et Global Water Futures. Ce mémoire n'aurait d'ailleurs pas été possible sans la contribution de données et d'outils d'Environnement et Changement climatique Canada, notamment la région de l'Atlantique, d'Énergie NB Power, et de Calcul Québec et Compute Canada.

Sur une note personnelle, je lance un grand merci à mes collègues d'université, plus particulièrement à Laurence, Gaëtan, Sébastien, Médéric et Eva, sans qui ces dernières années n'auraient pas été les mêmes. Finalement, je ne peux oublier de mentionner ma famille pour leur appui et leurs encouragements, tout spécialement ma sœur Virginie, dont les oreilles n'ont pas fini d'entendre parler de météorologie.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xv
RÉSUMÉ	xvii
INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Types de précipitations	4
1.2.1 Définitions et caractérisations	4
1.2.2 Formation des différents types de précipitation près de 0 °C	7
1.3 Modélisation des nuages et des précipitations.....	10
1.4 Défi dans la prévision	12
1.5 Objectifs de l'étude.....	14
CHAPITRE II APPROCHE ET MÉTHODE	17
2.1 Configuration du modèle atmosphérique.....	17
2.2 Données disponibles	19
2.3 Analyse des données.....	20
2.3.1 Conditions météorologiques lors de la tempête	20
2.3.2 Coupe verticale et distribution de tailles des particules	21
2.3.3 Analyse de l'accrétion de glace sur le réseau électrique.....	21
2.3.4 Analyse de la répartition et de la durée des coupures de courant	24
CHAPITRE III ÉTUDE DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES LORS DE LA TEMPÊTE	29
3.1 Aperçu des conditions synoptiques au début des précipitations.....	29
3.2 Trajectoire du système dépressionnaire.....	30
3.3 Distribution des précipitations à la surface.....	31
3.4 Comparaison de la simulation avec les observations	32

CHAPITRE IV	CONDITIONS THERMODYNAMIQUES ET DYNAMIQUES ..	49
4.1	Procédés de formation des précipitations verglaçantes.....	49
4.2	Coupe verticale au travers du front chaud.....	51
4.2.1	Conditions météorologiques de la coupe verticale	52
4.2.2	Types de précipitation.....	53
4.2.3	Distribution de tailles des particules glacées.....	55
CHAPITRE V	IMPACT DE L'ACCRÉTION DE GLACE SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE	75
5.1	Répartition et durée des coupures de courant	75
5.2	Approximation de la quantité d'accrétion de glace sur les fils électriques.....	76
5.3	Direction et intensité du vent	78
5.4	Relation entre les facteurs aggravants et la durée des coupures de courant.....	80
CHAPITRE VI	DISCUSSION ET CONCLUSION	95
6.1	Discussion	95
6.2	Conclusion	100
ANNEXE A	ÉVOLUTION TEMPORELLE DU TYPE DE PRÉCIPITATION SUR LES MARITIMES.....	103
ANNEXE B	ANALYSE DU COUVERT DE GLACE DU SERVICE CANADIEN DES GLACES DURANT LA TEMPÊTE	113
RÉFÉRENCES	117

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 2.1 Carte du domaine de simulation (ligne rouge) et de la répartition des données d'accumulation de précipitation de la division des régions de l'Atlantique d'ECCC entre le 24-26 janvier 2017. Les points rouges ne comprennent que l'accumulation totale alors que les étoiles comprennent en plus l'accumulation de pluie verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).....	26
Figure 2.2 Carte des stations d'observations de surface. Les données de température, de pression, du vent à 10 m et du type de précipitation ont été recueillies d'ECCC. Les données de quantités de précipitation observées (villes en bleu) ont, de plus, été recueillies du site web de UW. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005). 27	27
Figure 2.3 Carte du NB et des éléments référencés dans ce document. Les noms en lettres majuscules grises sont les comtés du NB. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005) et RNCAN (2017-).	28
Figure 3.1 Carte d'analyse et d'observation à 250 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent l'écoulement du vent. Les contours de couleurs bleues et les traits continus cyan représentent les isotaques. Récupérée de https://www.spc.noaa.gov/obswx/maps/	35
Figure 3.2 Carte d'analyse et d'observation à 500 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent les isohypses. Les traits pointillés rouges représentent les isothermes. Récupérée de https://www.spc.noaa.gov/obswx/maps/	36
Figure 3.3 Carte d'analyse et d'observations à 850 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent les isohypses. Les traits pointillés représentent les isothermes, en bleu pour $T < 0^{\circ}\text{C}$, en rouge pour $T \geq 0^{\circ}\text{C}$. Les traits continus verts sont des lignes d'égaux température du point de rosée. Récupérée de https://www.spc.noaa.gov/obswx/maps/	37

- Figure 3.4 Radiosondage observé à 0000 UTC le 25 janvier 2017 à Caribou, Maine. La courbe rouge est le profil de température alors que la courbe bleue tirée est le profil de la température du point de rosée. Les lignes guides du graphiques sont : les isobares (lignes noires horizontales), les isothermes (lignes noires en diagonales), le rapport de mélange saturé (lignes pointillées vertes), les adiabatiques sèches (lignes pointillées rouges) et les adiabatiques humides (lignes pointillées bleues). (Données récupérées de UWhhttp://weather.uwyo.edu/index.shtml.38
- Figure 3.5 Carte d'analyse et d'observations de surface de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus bruns représentent les isobares. L'analyse frontale de la NOAA est représentée par les lignes bleues (fronts froids), les lignes rouges (fronts chauds), les lignes lilas (fronts occlus) et les lignes rouges et bleues (fronts stationnaires). Récupéré de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php .
39
- Figure 3.6 Trajectoire du centre dépressionnaire entre 1200 UTC le 24 janvier et 1200 UTC le 26 janvier 2017. NOAA. La carte de fond est la situation à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus bruns représentent les isobares. L'analyse frontale de la NOAA est représentée par les lignes bleues (fronts froids), les lignes rouges (fronts chauds), les lignes lilas (fronts occlus) et les lignes rouges et bleues (fronts stationnaires). Carte de fond récupérée de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php ..40
- Figure 3.7 Carte d'analyse de la division de la région de l'Atlantique d'ECCC de l'accumulation totale de précipitation entre le 24 janvier et le 26 janvier 2017.....41
- Figure 3.8 Accumulation totale de précipitation entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Les cercles représentent les données aux stations d'observations fournies par ECCC. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).42
- Figure 3.9 Accumulation totale de précipitation verglaçante entre le 24 et le 26 janvier 2017 diagnostiquée à partir de la simulation GEM4. Les cercles représentent les données aux stations d'observations d'ECCC. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).
43
- Figure 3.10 Accumulation totale de pluie entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).44

- Figure 3.11 Accumulation totale de précipitation solide non givrée entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005). 45
- Figure 3.12 Accumulation totale de précipitation solide givrée entre le 24 et le 26 janvier 2017 diagnostiquée à partir de la simulation GEM4. Noter l'échelle différente des autres types de précipitation. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005)..... 46
- Figure 3.13 Radiosondage a) simulé et b) observé à 0000 UTC le 25 janvier 2017 à Caribou, Maine. La courbe rouge est le profil de température alors que la courbe bleue tiretée est le profil de la température du point de rosée. Données récupérées de UW <http://weather.uwyo.edu/index.shtml>. 47
- Figure 4.1 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 1200 UTC le 24 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).
58
- Figure 4.2 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 0000 UTC le 25 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).
59
- Figure 4.3 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 0000 UTC le 26 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).
60
- Figure 4.4 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 1300 UTC le 24 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante.

Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).....	61
Figure 4.5 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 0000 UTC le 25 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).....	62
Figure 4.6 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 0000 UTC le 26 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).....	63
Figure 4.7 Emplacement de la coupe verticale faite au travers de la NS, du NB et du Québec. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).....	64
Figure 4.8 Coupe verticale de la température et du vent horizontal simulés par le modèle GEM4 à a) 1300 UTC le 24 janvier, b) 2000 UTC le 24 janvier, c) 0900 UTC le 25 janvier et d) 1400 UTC le 26 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).....	65
Figure 4.9 Coupe verticale de l'humidité relative simulée par le modèle GEM4 à a) 1300 UTC le 24 janvier, b) 2000 UTC le 24 janvier, c) 0900 UTC le 25 janvier et d) 1400 UTC le 26 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).	66
Figure 4.10 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 1300 UTC le 24 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).	67
Figure 4.11 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0000 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).	68
Figure 4.12 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0900 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).	69
Figure 4.13 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) de la fraction de givrage c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4	

- à 2300 UTC le 24 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit). 70
- Figure 4.14 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) de la fraction de givrage c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0200 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit). 71
- Figure 4.15 Distribution de taille des particules glacées à 2300 UTC le 24 janvier. 72
- Figure 4.16 Distribution de taille des particules glacées à 0200 UTC le 25 janvier. 73
- Figure 4.17 Coupe verticale de la quantité de mouvement vertical et du rapport de mélange des nuages simulés par le modèle GEM4 à a) 2000 UTC le 24 janvier et à b) 0900 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit). 74
- Figure 5.1 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour le NB. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-). 83
- Figure 5.2 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour Miramichi. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005 : NB 2019) et RNCAN (2017-). 84
- Figure 5.3 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour la Péninsule acadienne. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005 : NB 2019) et RNCAN (2017-). 85
- Figure 5.4 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour le NB selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-). 86
- Figure 5.5 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour Miramichi selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la

- licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).....87
- Figure 5.6 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour la Péninsule acadienne selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).....88
- Figure 5.7 Carte montrant la direction des vents de surface sur Miramichi à 1200 UTC le 25 janvier et l'orientation du réseau électrique. Les lignes magenta représentent les lignes de transmission et les lignes vertes les lignes de distribution. Les cercles représentent la durée des coupures de courant des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).....89
- Figure 5.8 Carte montrant la direction des vents de surface sur la Péninsule acadienne à 1200 UTC le 25 janvier et l'orientation du réseau électrique. Les lignes magenta représentent les lignes de transmission et les lignes vertes les lignes de distribution. Les cercles représentent la durée des coupures de courant des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).....90
- Figure 5.9 Série temporelle des conditions locales à Miramichi entre le 1200 UTC le 24 janvier et le 0000 UTC le 27 janvier a) des vents horizontaux à 10 m, b) de la température à 2 m, c) du taux de précipitation simulés par le modèle GEM4 et de d) l'accrétion de glace produite par les modèles de Chaîné et Jones. Les observations horaires proviennent des METAR obtenus via les sites web de ECCC et de UW.....91
- Figure 5.10 Série temporelle des conditions locales à Bas-Caraquet entre le 1200 UTC le 24 janvier et le 0000 UTC le 27 janvier a) des vents horizontaux à 10 m, b) de la température à 2 m, c) du taux de précipitation simulés par le modèle GEM4 et de d) l'accrétion de glace produite par les modèles de Chaîné et Jones. Les observations horaires proviennent des METAR obtenus via les sites web de ECCC et de UW.92
- Figure 5.11 Relation entre la durée des coupures de courant de 5 jours et plus et a) l'accumulation totale de pluie verglaçante; b) le nombre d'heures de pluie verglaçante; c) l'épaisseur radiale équivalente de glace du modèle d'accrétion de Jones et d) les vents moyens à 10 m. Les couleurs représentent le comté

- affecté par la coupure de courant. Le rayon des cercles représente le vent maximum en km h^{-1} 93
- Figure A.1 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 24 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 104
- Figure A.2 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1800 UTC le 24 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 105
- Figure A.3 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0000 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 106
- Figure A.4 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0600 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 107
- Figure A.5 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 108
- Figure A.6 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1800 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 109
- Figure A.7 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0000 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 110
- Figure A.8 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0600 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface. 111
- Figure A.9 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la

position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.	112
Figure B.10 Analyse du couvert de glace par le Service canadien des glaces pour le 24 janvier 2017. Récupéré de https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=fr	114
Figure B.11 Analyse du couvert de glace par le Service canadien des glaces pour le 24 janvier 2017. Récupéré de https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=fr	115

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMS	<i>American Meteorological Society</i>
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ERA5	<i>ECMWF ReAnalysis version 5</i>
GEM	<i>Global Environmental Multiscale Model</i>
ISBA	Interaction sol-biosphère-atmosphère
MANOBS	<i>Manual of Surface Weather Observations</i>
METAR	<i>Meteorological Airport Report</i>
MRCC5	Modèle régional canadien du climat version 5
NB	Nouveau-Brunswick
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NS	Nouvelle-Écosse
OMM	Organisation météorologique mondiale
P3	<i>Predicted Particle Properties</i>
RNCAN	Ressources naturelles Canada

xvi

UW

University of Wyoming

RÉSUMÉ

Les précipitations hivernales sont la source de nombreux inconvénients à travers le Canada, tant pour les infrastructures que pour l'aspect économique. La tempête de verglas qui a touché les Maritimes entre le 24 et le 26 janvier 2017 est l'une des plus coûteuses pour le Nouveau-Brunswick. Des accumulations de glace allant jusqu'à 50 mm d'épaisseur sur le réseau électrique et les arbres ont provoqué des coupures de courant sur une grande étendue de la province. 133 000 foyers ont été privés d'électricité au plus fort de la tempête, et des personnes ont été touchées pendant près de deux semaines. Considérant le contexte des changements climatiques et de leurs impacts sur l'occurrence et la distribution d'événements extrêmes, cette recherche a eu pour but d'étudier les conditions météorologiques ayant mené à la sévérité de la tempête en utilisant des données de simulation numérique à haute résolution. Les résultats ont montré que la persistance d'une couche de fonte en altitude sur la région et le déplacement lent du système dépressionnaire ont permis l'accumulation de grandes quantités de glace. Les forts vents ont augmenté la charge sur le réseau de distribution d'électricité et les arbres en périphérie, causant un nombre important de coupures de courant. L'impact de la direction du vent par rapport au réseau électrique sur la répartition des coupures de courant a aussi été étudié. La simulation montre que la canalisation des vents due à la baie de Miramichi ainsi que l'orientation perpendiculaire aux vents du réseau électrique sur les berges de la rivière pourraient avoir contribué à la densité des coupures de courant dans cette région. L'étude future de plusieurs autres événements d'intenses précipitations verglaçantes pourrait contribuer davantage aux connaissances à ce sujet.

Mots-clés : pluie verglaçante, accrétion, glace, précipitations hivernales, canalisation, changement climatique, événement extrême, microphysique, *freezing rain*.

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Le Canada a connu de nombreux événements climatiques extrêmes liés aux précipitations au cours des trois dernières décennies. Le déluge du Saguenay en 1996 (Hamel 1996), de même que la tempête de verglas de 1998 (Milton et Bourque 1998) qui a affecté le sud du Québec, sont deux exemples remontant aux années 1990, mais il est possible de citer des événements plus récents comme les inondations de Calgary en 2013 (Liu et al. 2016). L'année 2017 a été particulièrement marquée à cet égard dans l'Est canadien avec la tempête de neige du 15 mars sur la région métropolitaine de Montréal, de même que les inondations printanières de la rivière des Outaouais. Entre le 24 et le 26 janvier, une tempête hivernale a balayé les Maritimes apportant une forte accumulation de glace sur les arbres et les lignes électriques, ce qui a causé des pannes électriques sur un grand territoire. Selon la compagnie Énergie NB Power (2017), qui qualifie l'événement de la plus grande opération de rétablissement de son histoire, près de 133 000 foyers ont été touchés sur une durée de deux semaines au Nouveau-Brunswick (NB) seulement. Un maximum de 50 mm de pluie verglaçante a même été enregistré à la station automatisée de Miramichi.

Les événements météorologiques verglaçants représentent un grand risque pour plusieurs secteurs, dû à l'accrétion de glace sur les structures telles que les lignes de distribution électriques et les tours de communication (Rezaei et al. 2016; Panteli et

Mancarella 2015 ; Makkonen et al. 2014 ; Lu et Kieloch 2005 ; Stuart et Isaac 1999 ; Yip 1995). Lors de la tempête de janvier 2017 au NB, l'accumulation de glace sur les installations d'Énergie NB Power aurait atteint des valeurs entre 50 et 100 mm dans la péninsule Acadienne, là où les clients ont été le plus durement touchés (Énergie NB Power 2017). De telles quantités surpassent la cote « sévère » de l'Association canadienne de normalisation, qui recommande une charge de glace minimale de 19 mm (Énergie NB Power 2017 ; Wagner et Nouveau-Brunswick (NB) 2017). Un rapport de Morris (2017), estimant la quantité de glace accrétée sur les lignes du réseau électrique grâce au modèle semi-empirique d'accrétion de glace de Chaîné et Castonguay (1974), ajoute même que la période de retour d'une accumulation de 50 mm à Miramichi correspondrait à plus de 100 ans.

Considérant l'impact des précipitations verglaçantes, plusieurs études ont cherché à quantifier et cartographier l'occurrence de celles-ci. Selon l'étude de Cortinas et al. (2004), de la pluie verglaçante tombe fréquemment au NB, avec un nombre médian d'heures annuelles entre 20 et 30 heures pour la période de 1976 à 1990. Plus récemment, Groisman et al. (2016) ont rapporté un nombre moyen de jours avec pluie verglaçante allant de 6 à 8 jours par an pour le NB entre 1975 et 2014. Dans l'optique des changements climatiques, certaines études ont étudié la possibilité de changements dans la fréquence d'occurrence de la pluie verglaçante étaient à prévoir pour l'Amérique du Nord. Groisman et al. (2016) se sont intéressés au passé récent en analysant les données recueillies dans la base de données de surface intégrées entre 1975 à 2014. Ces auteurs ont conclu qu'il n'y avait pas eu de tendances notables pour le Nord-Est américain quant à la variation de la fréquence d'occurrence entre la dernière décennie (2005-2014) et les trois précédentes (1975-2004). Yip (1995) s'est intéressé de son côté à cartographier la période de retour de 30 ans pour l'épaisseur radiale équivalente de glace sur un fil conducteur de 25 mm de diamètre. Selon ses résultats, le réseau électrique de l'Est canadien serait plus affecté que celui de l'Ouest canadien, avec des valeurs pouvant dépasser 30 mm par endroits. Les valeurs pour le

NB seraient maximales dans le sud-est, près de Moncton. Cette donnée corrobore avec ce qu'ont trouvé Lamraoui et al. (2013).

De plus, quelques études se sont intéressées aux changements projetés dans l'occurrence de la pluie verglaçante au Canada et l'intensité du vent. Ces deux facteurs sont importants à considérer pour l'estimation de l'accrétion de glace sur les réseaux électriques. Rezaei et al. (2018) rapportent qu'une augmentation de la charge due au vent et à la glace sur les installations électriques réduirait la fiabilité des lignes de transmissions actuelles. En ce qui a trait aux changements prévus pour la pluie verglaçante, Cheng et al. (2011) prévoient une hausse de l'occurrence de 20 % pour la période 2081 à 2100 pour le NB. Lambert et Hansen (2011) envisagent quant à eux un déplacement vers le nord du maximum du nombre moyen d'heures de pluie verglaçante sur l'Amérique du Nord, ce qui impliquerait une diminution pour les provinces de l'Atlantique. D'autres études plus récentes (Jeong et Sushama 2018 ; Jeong et al. 2018) utilisant des simulations du Modèle régional canadien du climat version 5 (MRCC5), modèle basé sur le modèle canadien de prévision numérique du temps, le modèle Global Environmental Multiscale (GEM), ont également prévu une baisse du nombre de jours, mais surtout de la quantité de pluie verglaçante en 2071-2100 pour le NB. Leurs résultats suggèrent également une diminution de l'épaisseur radiale maximale de glace pour la période de retour de 50 ans. Les simulations ne concordent cependant pas quant aux variations dans l'intensité du vent, mais le NB devrait subir un changement dans la distribution de la direction des vents maximums annuels. Pour ce qui est des changements prévus dans l'occurrence des rafales de vent, Cheng et al. (2014) ont utilisé leur modèle de rafales pour conclure en une augmentation en moyenne pour le NB et la NS. Cependant, ils ne rapportent qu'une faible augmentation prévue au sud du NB et la NS pour les mois d'hiver pour des rafales de vent de plus de 70 km h⁻¹.

1.2 Types de précipitations

1.2.1 Définitions et caractérisations

Lors de tempêtes hivernales associées à des températures près du point de congélation, les précipitations peuvent être sous forme solide, liquide ou mixte. Les précipitations solides regroupent, par exemple, la neige, le grésil et les cristaux de glace, alors que les précipitations liquides regroupent la pluie et la pluie verglaçante. De la bruine verglaçante peut aussi causer une accumulation de glace sur les structures. Les définitions suivantes sont issues du glossaire météorologique de la société américaine de météorologie (AMS 2019), qui définit les différentes catégories d'hydrométéores, des travaux de Thériault et al. (2006) et Thériault et Stewart (2007), ainsi que de l'atlas international des nuages de l'Organisation météorologique mondiale (OMM 2017).

- Précipitations solides :
 - Neige : Précipitation composée de cristaux de glace blancs ou translucides, principalement en forme hexagonale avec des branches complexes, et souvent agglomérés en flocons (AMS 2019).
 - Grésil : Type de précipitation consistant en des billes de glace transparentes ou translucides de diamètre inférieur à 5 mm (AMS 2019).
 - Graupel/neige roulée : Précipitation de particules de glace blanches et opaques, généralement coniques ou rondes dont le diamètre peut atteindre 5 mm (OMM 2017).

- Précipitations liquides :
 - Pluie : Précipitation sous forme de gouttes d'eau liquide ayant un diamètre supérieur à 0,5 mm, ou moins si les gouttes sont largement dispersées (AMS 2019).
 - Pluie verglaçante : Pluie qui tombe sous forme liquide mais qui gèle lors d'un impact pour former une couche de glace sur le sol et sur les objets exposés (AMS 2019).

- Précipitations mixtes :
 - Neige mouillée : Neige contenant une grande quantité d'eau liquide (AMS 2019).
 - Neige presque complètement fondue : Précipitation composée d'un mélange d'eau liquide et de glace dans laquelle la forme originale du flocon de neige n'est plus discernable (Thériault et al. 2006).
 - *Liquid-core pellets* : Particule partiellement regelée ayant une coquille de glace remplie d'eau liquide (Thériault et Stewart 2007).

Autres types d'hydrométéores :

- Bruine : Type de précipitation composée de gouttelettes d'eau dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm mais supérieur à 100 nm (AMS 2019).
- Bruine verglaçante : Bruine qui tombe sous forme liquide mais qui gèle lors d'un impact pour former une couche de glace sur le sol et sur les objets exposés (AMS 2019).

Considérant ces définitions, la principale différence entre la bruine et la pluie est leur diamètre maximal où les particules en dessous de 0,5 mm sont de la bruine. Cette dimension détermine si la particule sera ou non en suspension. Il est cependant possible d'avoir de la pluie à des diamètres inférieurs à 0,5 mm mais les gouttelettes sont alors plus dispersées que dans le cas de la bruine (AMS 2019). Le diamètre minimal considéré est alors 0,2 mm puisque cette valeur est limite pour supposer qu'une gouttelette puisse précipiter assez rapidement pour ne pas être dissipée par évaporation (AMS 2019). Dans le cas de la bruine, sa formation est liée aux nuages stratus, dont la base est assez basse pour que des diamètres inférieurs puissent se rendre à la surface sans être évaporés (OMM 2017). La grande concentration de gouttelettes de bruine peut ainsi donner des taux de précipitation jusqu'à 1 mm h⁻¹, malgré leur petit diamètre (OMM 2017).

Selon les conditions lors du gel, la glace peut également varier en densité et en apparence. Aux fins de ce mémoire, certaines définitions sont données ici :

- Verglas : Couche de glace, généralement claire et lisse, se formant sur les objets exposés par le gel d'un film d'eau surfondue déposé par la pluie, la bruine, le brouillard ou possiblement par la condensation de vapeur d'eau surfondue (AMS 2019).
- Givre : Dépôt granulaire opaque de glace de couleur blanche opaque ou laiteuse formé par le gel rapide de gouttes d'eau surfondues entrant en contact avec un objet exposé (AMS 2019).

Le verglas est plus dense ($\rho = 0,9-0,92 \text{ g cm}^{-3}$) que le givre ($\rho = 0,3-0,9 \text{ g cm}^{-3}$) (AMS 2019 ; Farzaneh 2008). Une distinction est faite entre, d'une part, la formation

du givre mou ($\rho < 0,6 \text{ g cm}^{-3}$), et d'autres part, la formation du givre dure ($0,6 \text{ g cm}^{-3} < \rho < 0,9 \text{ g cm}^{-3}$).

1.2.2 Formation des différents types de précipitation près de 0 °C

À cause des changements de phase impliqués, plusieurs processus thermodynamiques participent à la formation des différents types de précipitation aux températures près de 0 °C. La sublimation et la fonte des particules de glace ont des effets sur le type de précipitation reçu à la surface. Dans un environnement saturé, la fonte des particules de glace commence à $T = 0 \text{ °C}$. La température de fonte augmente cependant lorsque l'air est sous-saturé, puisque la sublimation de la particule de glace cause un refroidissement de l'air par l'absorption de chaleur latente par l'hydrométéore (Pruppacher et Klett 1997). Poirier (2017) ainsi que Barth et Parsons (1996) remarquent que le processus de sublimation est d'ailleurs plus important que celui de la fonte pour refroidir l'air durant les changements de phases dans un environnement sous-saturé. L'humidité joue donc un rôle important, s'ajoutant à celui de la température dans la détermination des processus pouvant affecter les hydrométéores.

Lorsqu'un flocon de neige ou un cristal de glace pénètre dans une couche de fonte en altitude, il peut en résulter la fonte totale ou partielle de celui-ci. La distribution de taille des hydrométéores de glace initiaux, l'épaisseur de la couche de fonte de même que la température et l'humidité vont influencer sur le ou les types reçus à la surface (Stewart et al. 2015 ; Czys et al. 1996). Les processus nécessitant initialement la présence d'un cristal de glace sont nommés *Ice-phase processes* par Stewart et al. (2015) et Carrière et al. (2000). Si la fonte est partielle et que le cristal de glace (ou flocon de neige s'il y a eu croissance du cristal de glace) retient sa forme originale, on parle alors de neige mouillée ; si la fonte est plus avancée, on retrouve de la neige presque complètement fondue (Thériault et Stewart 2010) à la surface, voire du grésil si la particule semi-fondue tombe au travers d'une couche de regel. Dans le cas de la

pluie verglaçante, la fonte est totale, et ce sont des gouttes d'eau surfondues qui traversent la couche de regel. Dans ce cas-ci, le gel se fait au contact d'une surface froide, ce qui donne du verglas. Ce processus de fonte et de regel est le plus fréquent pour la formation de pluie verglaçante (Carrière et al. 2000 ; Zerr 1997 ; Strapp et al. 1996), de même que pour le grésil (Zerr 1997). Ce type de profil vertical peut être rencontré en avant d'un front chaud, comme ce fut le cas lors de la tempête de verglas de 1998.

La pluie verglaçante peut également être produite sans la fonte d'un cristal de glace par des processus avec phase liquide (*Liquid-phase processes*) (Stewart et al. 2015; Carrière et al. 2000). Dans ce cas-ci, la vapeur d'eau condense pour donner des gouttelettes d'eau qui grossissent par collision et coalescence (Rauber et al. 2000; Carrière et al. 2000). Ce processus, appelé *warm rain process*, peut se produire en présence d'une couche chaude en altitude ou avec un profil de température entièrement sous le point de congélation. Bernstein (2000) rapporte que le sommet des nuages doit être bas, soit à environ 2 km, mais qu'il peut s'élever jusqu'à 4 km. La raison avancée par Rauber et al. (2000) pour cela est qu'à des températures de sommet du nuage supérieures à -10 °C, peu de noyaux glaçogènes sont actifs. La nucléation de la glace ne peut se faire que de manière hétérogène et qu'en présence de particules de glace. Les nuages sont alors principalement composés de gouttelettes d'eau surfondues (Pruppacher et Klett 1997). Il y a donc précipitation d'eau surfondue (Stewart et al. 2015), donnant ainsi de la pluie verglaçante ou de la bruine verglaçante. Selon Rauber et al. (2000), ce processus de formation serait le plus commun au-dessus des États-Unis (75 %) et résulterait surtout en de la bruine verglaçante. Le processus avec fonte de cristaux de glace serait responsable de seulement 25 % des cas de précipitations verglaçantes mais 80 % de ces cas seraient de la pluie verglaçante. Une autre étude de Carrière et al. (2000) portant sur l'Europe indique cependant que les processus avec fonte de cristaux de glace seraient

dominant sur ce continent, autant pour la formation de pluie verglaçante que de bruine verglaçante.

D'autres processus peuvent produire d'autres types de précipitations près de 0 °C. Par exemple, le grésil peut être formé à la suite du regel d'un flocon de neige presque complètement fondu, comme décrit plus haut, et sera classé « grésil de type a » (IPa) (Thériault et Stewart 2010). Le grésil peut également être formé par gel de contact entre une goutte d'eau surfondue et un cristal de glace qui amorcera le gel, et sera alors classé « grésil de type b » (IPb) (Stewart et al. 2015 ; Thériault et Stewart 2010). Ce processus est rendu possible grâce à la production secondaire de cristaux de glace localement sous la couche de fonte sans recours à un noyau glaçogène (Field et al. 2017). La particule de glace agit donc comme noyau glaçogène. L'un des processus est celui d'Hallett-Mossop, dans lequel des éclats de glace sont expulsés lors du givrage de la neige. Gibson et Stewart (2007), Gibson et al. (2009) ainsi que Stewart et Crawford (1995) ont remarqué dans leurs observations sur le grésil la présence de particules fracturées. Une hypothèse importante pour cette théorie est que le gel se produit de l'extérieur vers l'intérieur, augmentant ainsi la pression interne de la goutte d'eau surfondue qui gèle, et provoquant cette fracturation. Kolomeychuk et al. (1975) et Takahashi (1975) ont noté que plus les gouttes d'eau surfondues sont grosses, plus leur gel donne d'éclats. Field et al. (2017) rapportent les conditions nécessaires à ce phénomène : il faut des températures entre $-8\text{ °C} < T < -3\text{ °C}$, une vitesse d'impact entre 0,2 et 5 m s⁻¹, et des gouttelettes de plus de 23 μm de diamètre. Cet intervalle de température est important, puisqu'à une température plus froide que $T = -8\text{ °C}$, la coquille de glace entourant le noyau d'eau surfondue lors du gel serait trop épaisse pour permettre l'expulsion de cristaux de glace ; à l'inverse, une température plus chaude que $T = -3\text{ °C}$ lors du gel ne permettrait pas à la pression interne d'augmenter rapidement.

Les conditions de température et d'humidité lors du gel vont influencer sur la densité et l'apparence des particules glacées. La neige roulée se forme par accréation de gouttelettes d'eau surfondues sur des flocons de neige. Le gel est immédiat et rapide, ce qui entraîne la capture d'air dans la structure. La neige roulée est donc plutôt blanche et sa densité est inférieure à $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ (Pruppacher et Klett 1997 ; OMM 2017). Pour le grésil, la fonte partielle ou totale du flocon de neige rend la particule plus compacte (Stewart et al. 2015) et sa densité se rapprochera plutôt de celle de la glace ($0,92 \text{ g cm}^{-3}$, OMM 2017). Les travaux de List rapportés dans Pruppacher et Klett (1997) indiquent que la densité du grésil (types a et b dans la nomenclature du présent mémoire) peut varier entre $0,8$ et $0,99 \text{ g cm}^{-3}$. Il est possible que de l'eau liquide soit encore présente (*liquid-core pellet*) ce qui augmente la densité de la particule. Thériault et al. (2006) et Thériault et Stewart (2010) utilisent une valeur de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ pour les deux types de grésil. La densité et l'apparence du grésil peuvent dépendre du niveau de fonte du flocon initial (Stewart et al. 2015). Si le flocon n'est que partiellement fondu avant le regel, les cristaux de glace seront encore présents ce qui donnera une apparence plus opaque. À l'opposé, un flocon presque entièrement fondu sera plutôt transparent. L'opacité de la particule dépend aussi du temps de regel. Si la particule gèle rapidement, elle sera plus opaque, car les bulles d'air n'auront pas le temps de s'échapper de celle-ci.

1.3 Modélisation des nuages et des précipitations

Afin de pouvoir simuler les précipitations et les nuages, des schémas microphysiques couplés à des modèles atmosphériques de prévision numérique sont utilisés. Deux approches sont adoptées pour les schémas microphysiques, soit l'approche *bin*, ou spectrale (par exemple : Geresdi (1998);Khain et al. (2015)) et l'approche *bulk* (par exemple : Kessler (1969) [tiré de Khain et al. (2015)]; Thompson et al. (2004);

Milbrandt et Yau (2005); Morrison et Milbrandt (2015)). L'approche *bin* a comme avantages de représenter de manière explicite les équations microphysiques et d'être adaptable à toute région du globe (Khain et al. 2015). Les phénomènes météorologiques peuvent être étudiés autant en Arctique qu'à l'Équateur avec le même schéma. Cependant, cette grande explicitation et cette flexibilité vient avec un coût de calcul non négligeable, qui rend ce type de schéma difficilement applicable dans un contexte opérationnel (Milbrandt et Yau 2005). L'approche *bulk* utilise quant à elle une représentation paramétrique des processus microphysiques. Cette approche a l'avantage d'être plus efficace dans le coût de calcul (Khain et al. 2015 ; Milbrandt et Yau 2005). La distribution de taille des hydrométéores est généralement approximée par une fonction de distribution gamma à 3 paramètres (Morrison et Milbrandt 2015 ; Khain et al. 2015 ; Straka 2011 ; Milbrandt et Yau 2005). L'équation est décrite comme suit :

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (1.1)$$

où D est la dimension maximale des particules, $N(D)$ est la concentration par volume des hydrométéores, N_0 est le paramètre d'interception, μ est le paramètre de forme et λ est le paramètre de pente. Cette distribution de taille est utilisée pour chaque type d'hydrométéore séparément (Morrison et Milbrandt 2015 ; Khain et al. 2015 ; Straka 2011 ; Milbrandt et Yau 2005). En calculant certains moments de la distribution de taille des particules, il est possible de calculer l'évolution des certains paramètres. Les divers moments sont en retour associés à des variables prognostiques, une par paramètre inconnu (Morrison et Milbrandt 2015 ; Khain et al. 2015 ; Milbrandt et Yau 2005). En effet, Milbrandt et Yau (2005) mentionnent l'approche de Kessler (1969) consistant à prescrire ou diagnostiquer certains paramètres pour n'avoir qu'à en calculer un ou deux. Pour les schémas à 1 moment, la variable prognostique généralement prédite est le rapport de mélange de masse ce qui correspond au 3^e moment. Le paramètre λ varie donc, alors que N_0 et μ sont

gardés constants. Les schémas à deux moments ajoutent généralement le 0^{ième} moment ,correspondant à la concentration totale, et λ et N_0 varient alors que μ est gardé constant. Les schémas à trois moments ajoutent quant à eux la réflectivité radar qui correspond au 6^e moment (Morrison et Milbrandt 2015; Khain et al. 2015; Straka 2011; Milbrandt et Yau 2005).

1.4 Défi dans la prévision

Comme mentionné précédemment, les schémas microphysiques séparent généralement les hydrométéores en différentes catégories, tout en prescrivant certaines de leurs propriétés physiques, telles leur vitesse terminale, leur densité, etc. (Morrison et Milbrandt 2015). Les hydrométéores en phase liquide sont généralement bien représentés dans les schémas de type *bulk* où la pluie et les gouttes de nuages sont décrites séparément. Comme leur mode de croissance, respectivement par coalescence-collision et par diffusion de vapeur respectivement (Morrison et Milbrandt 2015 ; Pruppacher et Klett 1997), ainsi que leurs grosseurs typiques sont bien définis, la paramétrisation des hydrométéores liquides n'est pas le plus grand défi. Les hydrométéores glacés présentent davantage de formes, densité et de mode de croissance que les hydrométéores, ce qui rend la séparation en différentes catégories plus compliquée (Morrison et Milbrandt 2015 ; Thériault et Stewart 2010). Une étude de Thériault et al. (2015) a d'ailleurs démontré l'importance du type de flocon sur sa trajectoire et l'impact que ça occasionne pour la collecte des observations.

Un autre problème découle du fait que les catégories typiques de glace n'incluent pas de particules semi-fondues, ni de distinction entre la neige roulée et le grésil (Reeves et al. 2016). Des études de Thériault et al. (2010 ; 2006) ont montré l'importance des particules semi-fondues lorsque la température est près de 0 °C, et le besoin de représenter le profil vertical de température avec précision. Les particules semi-

fondues permettent notamment d'obtenir du grésil (type a) en surface, et la chaleur latente échangée avec l'environnement lors des changements de phase impacte les types de précipitations. Ces mêmes précipitations peuvent interagir entre elles ce qui modifie les types perçus à la surface de même que la grosseur des particules. Morrison et Milbrandt (2015) ont d'ailleurs rapporté que les schémas microphysiques plus anciens n'utilisaient qu'une seule variable prognostique, soit le rapport de mélange de masse, pour représenter les hydrométéores glacés, liant ainsi le nombre maximal de particules au rapport de mélange de masse. Or, dans le cas où des particules de glace entrent en collision avec de l'eau surfondue, il y a accréation, et la masse de la particule augmente même si le nombre de particules glacées ne change pas. Carmichael et al. (2011) ont rapporté l'importance de l'impact de l'agrégation du grésil. Barcz et al. (2018) ont également rapporté et du gel par collision sur la quantité de pluie verglaçante à la surface.

Pour pallier ces problèmes de paramétrisation des différentes catégories de glace, certains schémas visent à éliminer les conversions non physiques entre les catégories en faisant évoluer les propriétés physiques des particules dans le temps (Morrison et Milbrandt 2015). L'ajout d'une fraction liquide pour mieux représenter les particules en phase mixte a également fait l'objet d'études récentes (Cholette et al. 2019; Ryzhkov et al. 2014).

Une meilleure représentation des types de précipitation permettrait également de mieux approximer l'accréation de glace sur les infrastructures. Farzaneh (2008) rapporte que le verglas et le givre dur ont une plus forte adhérence aux surfaces, alors que le givre mou et la neige mouillée adhèrent modérément aux surfaces. La vitesse du vent et sa direction, la température et le taux de précipitation verglaçante servent également dans les modèles d'accréation de la glace (Jones 1998; Makkonen 1984; Goodwind et al. 1983 [tiré de Makkonen (1998)]; Chaîné et Castonguay 1974).

1.5 Objectifs de l'étude

Lors de la tempête hivernale du 24 au 26 janvier 2017, plusieurs types de précipitations ont été produits dû aux températures avoisinant le point de congélation. Le passage d'un front chaud associé à ce système dépressionnaire a généré les conditions permettant d'obtenir des précipitations sous phases solide, liquide et mixte. Étant donné la gravité de la tempête de verglas sur la province du NB, il est essentiel de mieux comprendre les conditions météorologiques qui ont mené à l'accumulation de glace au sol et ainsi qu'à des pannes de courant majeures au NB. En particulier, cette étude veut analyser les processus ayant mené à la distribution de précipitation (type et intensité) à la surface, de même que les facteurs aggravants ayant mené à d'importantes pannes de courant au NB.

L'étude sera menée en analysant d'abord les observations disponibles liées à la tempête afin de comprendre la situation synoptique lors de cet événement météorologique. Par la suite, une simulation à haute résolution ($0,009^\circ \sim 1 \text{ km}$) de la tempête avec le modèle atmosphérique GEM intégrant un schéma microphysique poussé (Morrison and Milbrandt, 2015) sera utilisée afin de pouvoir compléter l'analyse de la tempête là où les observations ne le permettent pas. Une étude de la distribution verticale et horizontale des précipitations ainsi que du lien entre la durée des pannes de courant et les conditions météorologiques sera également menée.

Ce mémoire est séparé en 6 chapitres. Le chapitre I est l'introduction, suivie de l'approche et de la méthode au chapitre II. Le chapitre III présente une analyse des observations météorologiques lors de la tempête grâce aux observations. Le chapitre IV montre la comparaison entre la simulation et les observations, afin de s'assurer que les conditions synoptiques et la répartition des précipitations ont bel et bien été reproduites. Par la suite, le chapitre IV s'intéresse aux conditions thermodynamiques et dynamiques lors de la tempête. Les sous-sections du chapitre

IV discuteront de l'évolution, à l'horizontale et selon une coupe verticale des conditions météorologiques, des types de précipitations, ainsi que de la distribution de taille des particules de glace. Le chapitre V présente une analyse de l'accrétion de glace sur le réseau électrique. La répartition des coupures de courant et l'étude des facteurs aggravants, de même qu'une étude des conditions locales aux endroits les plus touchés par la pluie verglaçante, y sont également abordées. Pour finir, le chapitre VI présente une brève discussion des résultats, de même qu'une conclusion.

CHAPITRE II

APPROCHE ET MÉTHODE

2.1 Configuration du modèle atmosphérique

Le modèle canadien de prévision numérique du temps, le *Global Environmental Multiscale* version 4.8 (GEM4), est utilisé dans cette étude pour simuler la tempête hivernale (Milbrandt et al. 2016; Côté et al. 1998). Le modèle utilise des coordonnées de pression log-hydrostatique hybrides suivant le terrain, correspondant à 62 niveaux verticaux. Les niveaux verticaux sont décalés, séparant ainsi les équations du mouvement des équations thermodynamiques, afin de réduire le bruit numérique (Milbrandt et al. 2016). Le domaine libre de simulation comprend 1296 x 1004 points de grille, à une résolution horizontale de 0,009°. La simulation débute à 0000 UTC 24 janvier 2017 et se termine le 0000 UTC 27 janvier 2017 avec un pas de temps de 30 s et un archivage des données à chaque heure. La simulation est pilotée aux frontières par les réanalyses ERA5 (résolution horizontale est de 0,3°), avec informations aux 60 minutes. Ces mêmes réanalyses servent de conditions initiales pour l'atmosphère et la température de surface de l'océan, alors que le sol est initialisé par les analyses du modèle régional de prévision d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Le modèle GEM4 utilise le schéma de surface d'interaction sol-biosphère-atmosphère (ISBA) (Milbrandt et al. 2016).

Le schéma microphysique utilisé est le *Predicted Particle Properties* (P3), développé par Morrison et Milbrandt (2015). C'est un schéma à deux moments prédisant le rapport de mélange de masse et la concentration en nombre total. Deux catégories d'hydrométéores liquides sont présentes dans ce schéma, soit les gouttelettes de nuage et la pluie, alors qu'une seule catégorie d'hydrométéores de glace, dite libre, est utilisée. Cette particularité du schéma microphysique P3 permet de décrire la distribution des particules de glace en fonction de quatre variables prognostiques pouvant évoluer librement au lieu de donner une distribution de taille propre à chacun des types d'hydrométéores glacés typiques (ex. : neige, grêle, etc.). Ces variables sont le rapport de mélange total de glace, le rapport de mélange de glace givrée, la concentration totale en nombre de particules solides et le rapport de mélange de volume givré (Morrison et Milbrandt 2015). Les processus microphysiques associés à la glace présents dans le schéma microphysique P3 sont la nucléation des cristaux de glace, la sublimation/déposition de la glace (si la température est inférieure à 0 °C), le gel hétérogène et homogène, le gel par contact, la fonte, la sédimentation de même que le givrage (dans un environnement sec ou saturé).

Les variables de sortie de la simulation près de la surface sont la température à 2 m, les vents horizontaux à 10 m, la pression au niveau moyen de la mer, l'humidité spécifique à 2 m, et la quantité de précipitation. Les précipitations sont séparées en 3 catégories, soit la précipitation totale, liquide et solide. La pluie verglaçante et le grésil sont diagnostiqués par la suite. Les variables représentées à la verticale incluent la température, l'humidité spécifique, le géopotential, les vents horizontaux, la vitesse verticale ω , les 4 variables prognostiques pour la glace ainsi que les rapports de mélange de masse et de nombre pour la pluie et les nuages.

2.2 Données disponibles

Afin de vérifier que la simulation est en mesure de reproduire les conditions de la tempête hivernale, des données de surface et en altitude sont nécessaires. Des observations manuelles (MANOBS) contenant les quantités de précipitations totales de même que le total de pluie verglaçante pour certaines stations ont été fournis par la division des régions de l'Atlantique d'ECCC (fig. 2.1). Des données horaires d'ECCC ont également été utilisées pour obtenir les conditions à la surface durant l'événement à différents endroits au NB et en Nouvelle-Écosse (NS), notamment la température, la pression, l'humidité relative ainsi que de la vitesse et la direction des vents. Les taux de précipitation horaires de rapport d'observations météorologiques pour l'aviation (METAR) ont pu être recueillis pour quelques stations sur le site web de l'Université du Wyoming (UW) afin de compléter les données en surface. La figure 2.2 montre l'emplacement des stations disponibles. Une troisième carte du NB (fig. 2.3) a été produite afin d'aider le lecteur à s'orienter par rapport aux différents lieux du NB. Dans ce document, des données de la Base de données toponymiques du Canada (Ressources naturelles Canada (RNCAN) 2017-) ont été utilisées pour l'écriture officielle des noms des municipalités et leur emplacement géographiques. Les limites des comtés ont été récupérées du catalogue de données GeoNB et proviennent du Ministère des Ressources naturelles et du Développement de l'énergie (NB 2005). Les limites des zones municipales, également récupérées de GeoNB, proviennent du Ministère de l'Environnement et Gouvernements locaux (NB 2019).

Les cartes d'analyses en altitude proviennent quant à elles du site web de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Les cartes à 250 hPa permettent de décrire la circulation à grande échelle. La direction du vent ainsi que sa vitesse, de même que l'emplacement des cœurs de courant-jet, sont représentés. Les cartes à 500 hPa permettent de représenter les hauteurs du géopotential (isohypses), donnant ainsi l'emplacement des creux/crêtes en altitude. Les cartes à 850 hPa contiennent

également les isohypses et les isothermes, qui indiquent l'advection de température. Finalement, les cartes en surface contiennent des informations sur les données de surface (par exemple : la pression au niveau moyen de la mer, la température, etc.) et l'analyse de la NOAA indique l'emplacement du centre dépressionnaire des systèmes météorologiques, de même que les fronts. Afin de compléter les cartes d'analyses en altitude, les images du radar de Chipman, NB, issues de la banque d'images radars météorologiques canadiens lors de la tempête ont été récupérées.

Finalement, Énergie NB Power a également fourni des données quant aux coupures de courant durant l'événement, grâce à des cartes du réseau électrique dans le nord-est du NB de même que des informations sur la répartition et la durée des coupures de courant engendrées par les précipitations de cette tempête hivernale extrême.

2.3 Analyse des données

La présente section décrit comment les données ont été analysées. Premièrement, les conditions météorologiques lors de la tempête sont décrites à l'échelle synoptique. Deuxièmement, une coupe transversale permet d'étudier les processus microphysiques qui ont joué un rôle dans l'ampleur de la crise de verglas. Troisièmement, l'accumulation de glace sur le réseau électrique est approximée par des modèles d'accrétions de glace. Finalement, les données liées aux coupures de courant sont analysées en lien avec les précédentes analyses afin de faire ressortir les facteurs aggravants.

2.3.1 Conditions météorologiques lors de la tempête

L'analyse des données débute par une description de la situation synoptique ainsi que de la distribution des précipitations à la surface lors de la tempête du 24-26 janvier

2017, en utilisant les données d'observations. La deuxième étape consiste à vérifier que la simulation reproduit convenablement ces conditions. Un aspect important concerne la distribution et l'intensité des précipitations à la surface. Les conditions synoptiques sont comparées aux cartes d'analyse de la NOAA. Des comparaisons entre les images radar et la simulation à plusieurs moments permettent également de voir si la tempête a évolué de manière similaire à l'événement réel. Pour finir, les conditions météorologiques à la surface sont comparées pour les stations où les observations sont disponibles. Ces deux premières étapes serviront à faire ressortir des facteurs clés ayant mené à la tempête, à déterminer les régions d'intérêt à étudier, de même qu'à justifier l'utilisation de la simulation comme représentation acceptable pour le reste de l'étude.

2.3.2 Coupe verticale et distribution de tailles des particules

Une étude de la structure verticale de la tempête est ensuite effectuée. Le tracé de la coupe verticale, utilisé pour cet objectif, est déterminée par l'emplacement de la couche de fonte en altitude durant l'événement et par les endroits les plus touchés par la pluie verglaçante. Cette étude permettra de faire ressortir le type de précipitation en altitude et sa corrélation avec le type reçu à la surface, la direction des vents horizontaux à différentes hauteurs, les mouvements verticaux durant l'événement de même que l'humidité relative. La distribution de tailles des particules de glace est également analysée à divers moments lorsque du grésil a été diagnostiqué.

2.3.3 Analyse de l'accrétion de glace sur le réseau électrique

Afin d'évaluer les facteurs ayant joué un rôle dans l'étendue et la durée des pannes de courant, une étude de l'accumulation de glace sur les câbles électriques est réalisée au

moyen de deux modèles d'accrétion de glace. Les deux modèles ont l'avantage de ne pas nécessiter un grand nombre de variables météorologiques pour être utilisés.

Le premier modèle est le modèle semi-empirique d'accrétion de glace de Chaîné développé en 1974 (Chaîné et Castonguay 1974 ; Chaîné et Skeates 1974). Ce modèle est utilisé par ECCC depuis longtemps (Morris 2017 [nonpublié] ; Poots 1996) et par Manitoba Hydro (Lu et Kieloch 2005). Yip (1995) a également utilisé le modèle de Chaîné (Chaîné et Skeates 1974), et c'est cette version qui est utilisée dans ce mémoire.

Le modèle utilise quelques suppositions, notamment une densité de la glace (ρ_i) de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ et une fraction de givrage de 1 (Makkonen 1998 ; Yip 1995 ; Chaîné et Skeates 1974). L'accrétion de glace à l'horizontale H (en pouce) et l'accrétion de glace verticale V (en pouce) sont déterminées par les équations suivantes :

$$H = I \quad (2.1)$$

$$V = 0,078vI^{0,88} \quad (2.2)$$

où I est le taux de précipitation (en pouce/heure) et v est la vitesse du vent (en mille/heure). Yip (1995) a utilisé les travaux de McKay et Thompson (1969) pour déterminer l'équation 2.2. Grâce aux travaux de Stallabrass et Hearty (1967), les accrétions horizontale et verticale de glace sont combinées pour donner une relation déterminant l'épaisseur radiale équivalente de glace A (en pouce) (Chaîné et Castonguay 1974). La relation est :

$$A = \sqrt{\frac{KR}{2}(H^2 + V^2)^{1/2} + R^2} - R \quad (2.3)$$

où R est le rayon de la section du câble électrique (en pouce) et K est un facteur de correction qui dépend du rayon de la surface d'accrétion et de la température de l'air (Makkonen 1998 ; Jones 1998 ; Yip 1995 ; Chaîné et Castonguay 1974). Il est d'avis

que le facteur de correction dépend principalement du rayon de la surface d'accrétion plutôt que de la température (Makkonen 1998 ; Jones 1998 ; Yip 1995). Pour cette raison et considérant que la pluie verglaçante se produit près du point de congélation, le facteur de correction peut être approximé par cette expression lorsque la température de l'air est de 0 °C (Poots 1996) :

$$K = \frac{1}{0,1858+0,312R} \quad (2.4)$$

Le deuxième modèle utilisé est le modèle d'accrétion de glace développé par Jones (1998). Le modèle présume que l'efficacité de collecte des gouttes de pluie est de 1, que la glace est répartie uniformément sur le câble et que toute l'eau qui rentre en contact avec le câble gèle. La densité de la glace suite au gel de la pluie verglaçante est également supposée égale à $\rho_i = 0,9 \text{ g cm}^{-3}$. Contrairement au modèle de Chaîné (1974) qui utilise la relation de Marshall et Palmer (1948) pour exprimer le contenu en eau liquide, Jones (1998) préfère utiliser la formule de Best (1949). L'épaisseur radiale équivalente de glace peut ainsi être calculée à partir de la relation suivante:

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^N [(I_j \rho_0)^2 + (3,6 V_j W_j)^2]^{1/2} \quad (2.5)$$

où R_{eq} est l'épaisseur uniforme radiale de glace (en mm), ρ_0 est la densité de l'eau (égale à $1,0 \text{ g cm}^{-3}$), V est la vitesse du vent (m s^{-1}), W est le contenu en eau liquide (g m^{-3}) et N est le nombre d'heures d'accrétion. À noter que le taux de précipitation, I , est en mm h^{-1} .

Aux fins de cette étude, deux autres critères doivent être pris en compte lors de l'application des modèles d'accrétion de glace. Tout d'abord, afin de pouvoir comparer les résultats avec d'autres études (Morris 2017 [nonpublié]; Lu et Kieloch 2005 ; Makkonen 1998), le modèle de Chaîné suppose qu'un diamètre de 25 mm pour le câble électrique. Pour les deux modèles, l'accrétion de glace commence dès que des gouttes d'eau surfondues gèlent sur la surface, et se poursuit

tant que les températures n'excèdent pas 1°C. Un autre critère sur la durée est souvent utilisé (Jeong et al. 2018 ; Morris 2017 [nonpublié]) mais, comme la simulation n'est que de 72 h, elle n'est pas applicable dans ce cas-ci.

2.3.4 Analyse de la répartition et de la durée des coupures de courant

Afin de faire ressortir les facteurs aggravants de la tempête, le lien entre ceux-ci et la répartition et la durée des coupures de courant est exploré. Les facteurs aggravants étudiés sont la vitesse et la direction du vent ; la durée des précipitations verglaçante ; l'accumulation totale de pluie verglaçante ; et, finalement, l'accrétion de glace sur les conducteurs.

La première étape de cette exploration est une analyse visuelle en projetant les diverses données sur des cartes du NB. Considérant que les données des coupures de courant de NB Power Énergie sont généralisées par milieux urbains et ruraux, leurs emplacements sur les cartes sont représentés par les coordonnées géographiques de celles-ci, et donnent une idée générale des lieux touchés. Une exception est la baie de Miramichi qui représente les bâtiments autour de la baie mais dont le point géographique correspondant est au milieu de la baie. De ce fait, les emplacements exacts des coupures de courant sont inconnus. L'impact de la direction du vent ne peut donc qu'être analysé de façon visuelle par rapport à la configuration du réseau électrique des villes et des municipalités touchées.

Pour toutes les autres données, la deuxième étape est de mettre en opposition, sur un graphique à nuage de points, les facteurs aggravants (ordonnées) par rapport à la durée des coupures de courant (abscisse). La vitesse moyenne du vent durant l'événement est également représentée par le rayon des points. L'emplacement géographique est quant à lui représenté par une couleur en lien avec le comté de la ville ou municipalité touchée. Puisque certaines données sont qualitatives et d'autres

sont quantitatives, cette méthode semblait la mieux adaptée pour faire ressortir les éléments clés de la tempête.

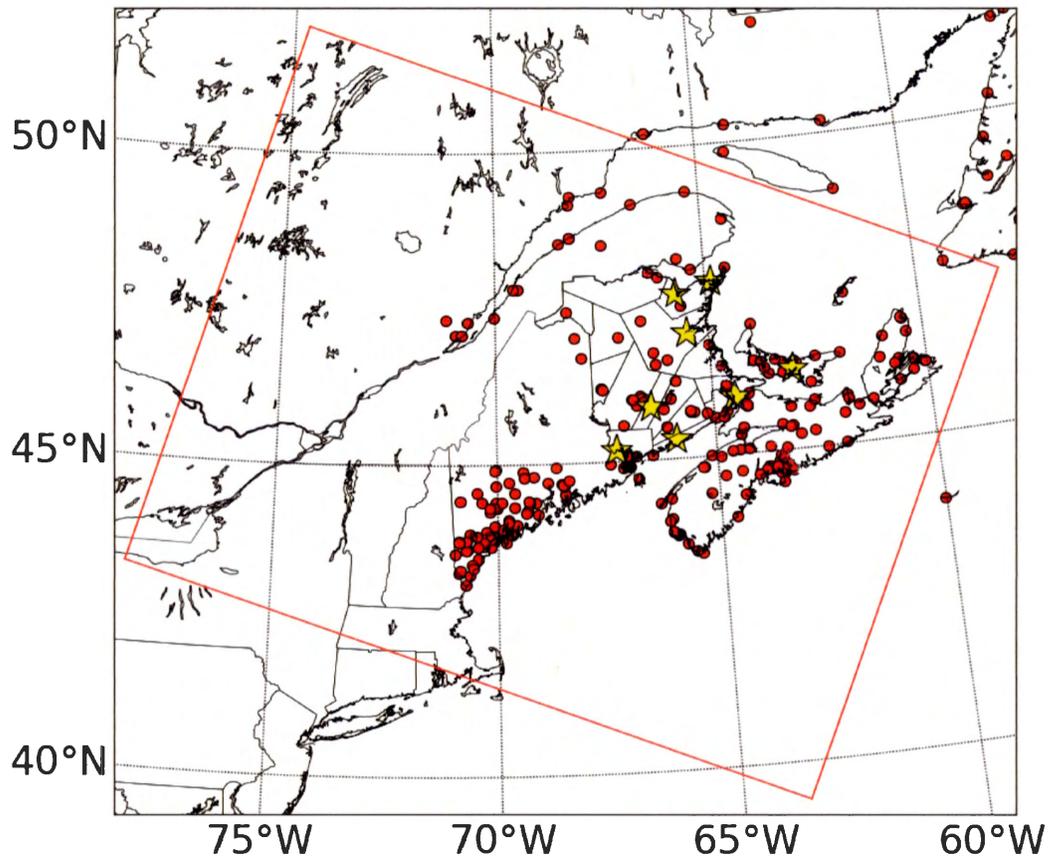


Figure 2.1 Carte du domaine de simulation (ligne rouge) et de la répartition des données d'accumulation de précipitation de la division des régions de l'Atlantique d'ECCC entre le 24-26 janvier 2017. Les points rouges ne comprennent que l'accumulation totale alors que les étoiles comprennent en plus l'accumulation de pluie verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

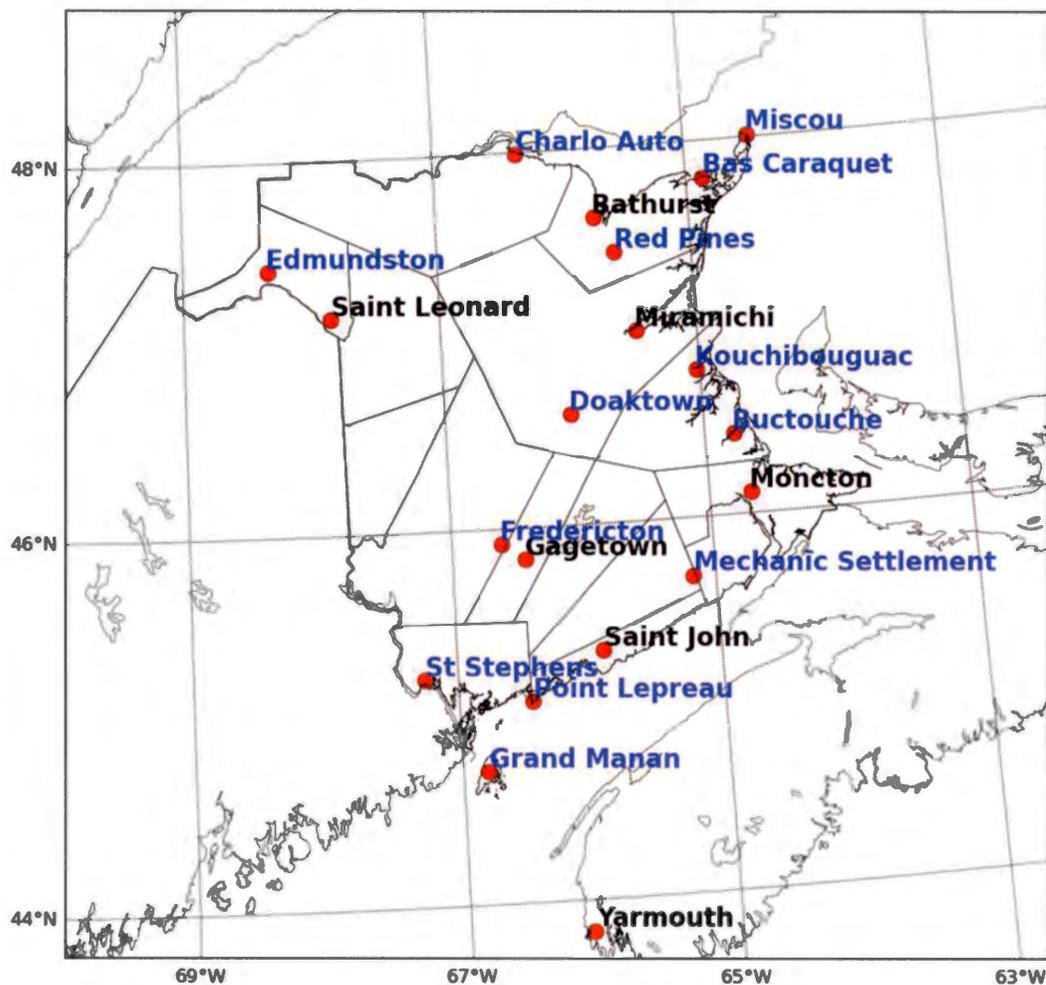


Figure 2.2 Carte des stations d'observations de surface. Les données de température, de pression, du vent à 10 m et du type de précipitation ont été recueillies d'ECCC. Les données de quantités de précipitation observées (villes en bleu) ont, de plus, été recueillies du site web de UW. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

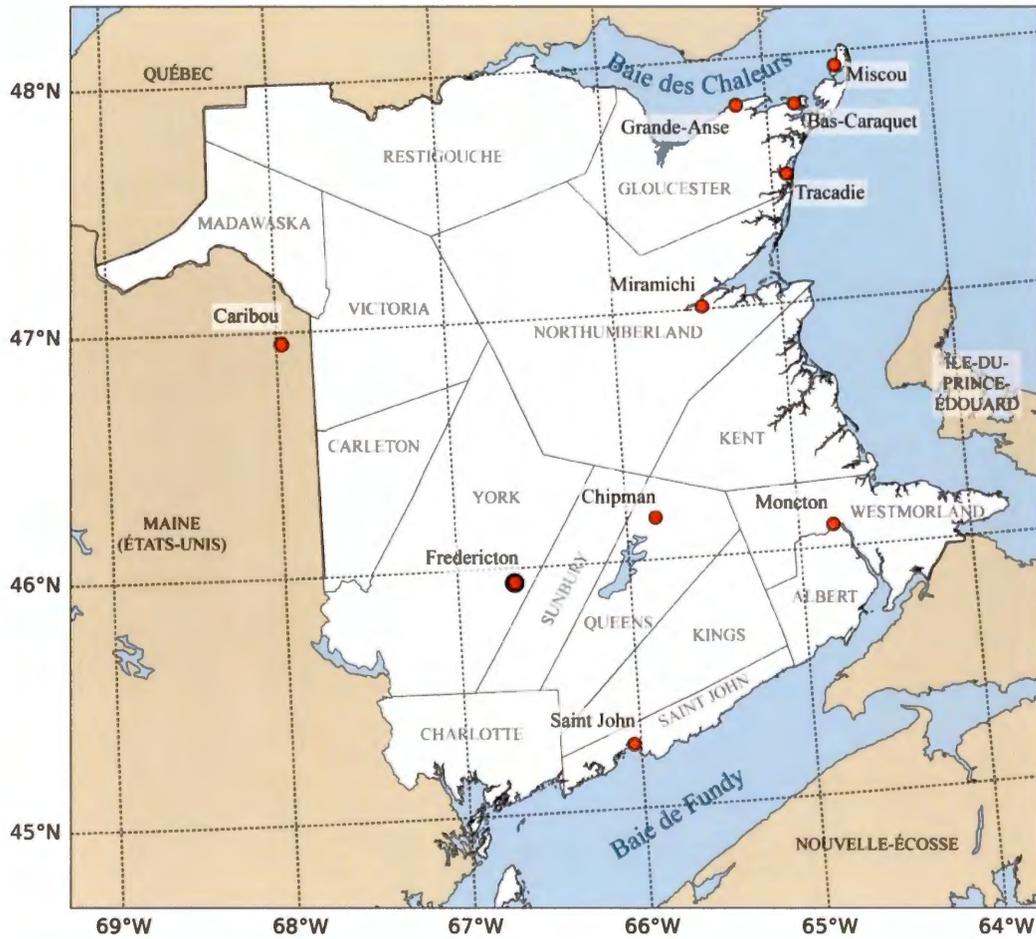


Figure 2.3 Carte du NB et des éléments référencés dans ce document. Les noms en lettres majuscules grises sont les comtés du NB. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005) et RNCAN (2017-).

CHAPITRE III

ÉTUDE DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES LORS DE LA TEMPÊTE

3.1 Aperçu des conditions synoptiques au début des précipitations

La circulation générale suggérée par l'écoulement de l'air à 250 hPa (fig. 3.1) et le champ des hauteurs du géopotential à 500 hPa (fig. 3.2) révèlent la présence d'une crête au-dessus des Maritimes à 1200 UTC le 24 janvier 2017. Un creux orienté du sud-est au nord-ouest est également présent au sud de la ville de New York. Il se trouve positionné directement sous le creux à 250 hPa (fig. 3.1). Cette inclinaison négative du creux, causée par l'occlusion d'un système dépressionnaire (identifiable par les contours fermés des isobares en surface et des isohypses en altitude (fig. 3.2, 3.3 et 3.5)) et la présence de la crête à l'est, indique la présence d'un système dépressionnaire en phase mature à la surface (Haby, J. s.d.). De plus, cette configuration indique une forte advection différentielle de température positive à l'avant du système (advection d'air froid dans les hauts niveaux au de-ssus d'avection d'air chaud dans les bas niveaux de l'atmosphère), ce qui diminue la stabilité statique de la couche d'air. Les mouvements ascendants sont ainsi favorisés, ce qui génère une quantité de précipitation plus importante en présence d'humidité suffisante.

Au même moment, le champ des épaisseurs 1000-500 hPa indique une température moyenne verticale près de 0 °C au-dessus du comté du Kent et la Péninsule acadienne, suggérant ainsi la présence d'air chaud en altitude. La carte d'altitude à 850 hPa à 1200 UTC le 24 janvier (fig. 3.3) montre l'advection d'air chaud à ce

niveau associée avec le déplacement du front chaud en surface, de l'océan Atlantique vers les Maritimes. Les températures à 850 hPa au-dessus du NB et de la NS augmentent ainsi au-dessus du point de congélation. Le radiosondage de Caribou, dans le nord-est du Maine, à 0000 UTC le 25 janvier (fig. 3.4) montre un profil vertical de température typique de précipitations verglaçantes, impliquant de l'advection d'air chaud dans les bas niveaux, donnant lieu à une couche de fonte. Les conditions durant l'événement étaient ainsi favorables aux précipitations verglaçantes avec des températures sous le point de congélation près de la surface.

Un autre élément à considérer sur les cartes en altitude (fig. 3.2 et 3.3) est la présence de contours fermés dans l'axe du creux, signes de l'occlusion de la dépression en surface. La figure 3.5 montre le champ de pression au niveau moyen de la mer et les conditions à la surface. Selon l'analyse de la NOAA, le centre dépressionnaire se trouvait sous le creux en altitude, au sud de la ville de New York. La dépression avait progressé au stade d'occlusion avant même de se rendre sur les Maritimes.

À 1200 UTC 25 janvier, les creux à 250 hPa et 500 hPa (figures non montrées) se sont davantage inclinés vers l'ouest et la carte à 500 hPa à 1200 UTC 25 janvier (non montrées) indique une baisse des hauteurs du géopotentiel au-dessus du NB.

3.2 Trajectoire du système dépressionnaire

La figure 3.6 montre la trajectoire de la tempête entre le 1200 UTC 24 janvier et le 1200 UTC 26 janvier. À 1200 UTC le 24 janvier, le centre dépressionnaire se trouvait au sud de la ville de New York et avait commencé à se combler. Sa position sous les creux en altitude l'empêchait de recevoir du support en altitude et elle se déplaçait lentement. La dépression a par la suite longé la côte Est américaine tout en restant sur l'océan Atlantique pour rejoindre la NS. Vers 1200 UTC 25 janvier, le système dépressionnaire a stagné près de la côte de la NS. L'analyse de la NOAA montre

plusieurs centres dépressionnaires. Il est possible que la longévité de la tempête soit liée à des reformations de centres dépressionnaires associées avec la zone frontale. La dépression a par la suite poursuivi son chemin pour contourner la NS et arriver dans le golfe du Saint-Laurent à 1200 UTC 26 janvier. Cette trajectoire vers le nord-ouest s'explique par l'écoulement imposé par le creux incliné vers l'ouest à 250 hPa (fig. 3.1) à cette date.

La trajectoire de la tempête sur l'océan Atlantique a également amené deux autres éléments importants, notamment une diminution du frottement qui aurait contribué au comblement du centre dépressionnaire en surface, et surtout l'apport de chaleur et d'humidité par l'océan, pouvant générer de la convection. Ce dernier élément, lié avec l'axe négatif du creux à 250 hPa, a donné des quantités considérables de précipitations comme il est discuté ci-après.

3.3 Distribution des précipitations à la surface

Durant la tempête, d'importantes quantités de précipitations mixtes sont tombées sur les Maritimes. La figure 3.7, d'ECCC, montre l'analyse de l'accumulation totale de précipitation entre le 24 et le 26 janvier 2017. Les données en rouge montrent les valeurs de quantité et du nombre d'heure relatives à la pluie verglaçante là où les données étaient disponibles. Des maximums de précipitations totales pour le NB de plus de 100 mm et 85 mm d'équivalent en eau liquide ont été enregistrés respectivement à la station météorologique de Gaspereau Forks, près de Chipman, et à la station d'Oak Point, près de Saint John (se référer à la fig. 2.3 au besoin pour localiser ces municipalités). Le maximum absolu a cependant été enregistré à Ingonish Beach, NS, avec jusqu'à 127 mm d'accumulation. Pour ce qui est de la pluie verglaçante, un maximum de plus de 50 mm d'accumulation pendant 31 h a été enregistré à Miramichi, NB. La carte montre de plus que la pluie verglaçante a été enregistrée le long de la côte est du NB et vers le sud, de même que sur l'Île-du-

Prince-Édouard. Des MANOBS d'ECDC à différentes stations rapportent également de la pluie verglaçante dans la péninsule Acadienne, NB, et dans la pointe est de la NS.

3.4 Comparaison de la simulation avec les observations

Les champs simulés des hauteurs du géopotential en altitude et le champ de pression au niveau moyen de la mer (non montrés) sont maintenant comparés à ceux des analyses de la NOAA. Sur les cartes à 250 hPa et à 500 hPa à 1200 UTC 24 janvier, une crête est présente au-dessus des Maritimes et un creux négativement incliné se trouve plus à l'ouest de la crête. Les conditions en altitude de la simulation reflètent donc la situation observée au début de l'événement pour les Maritimes.

Le champ de pression au niveau moyen de la mer (non montré) a été très bien reproduit durant l'événement. Les limites du domaine de simulation ne permettent pas de comparer l'emplacement des centres de dépression mais les patrons des isobares ressemblent à ceux de l'analyse de la NOAA mentionnés dans la section 3.1. À 1800 UTC le 25 janvier, le même relâchement des isobares autour du centre dépressionnaire suggère que le modèle a également reproduit la formation de centres dépressionnaires secondaires avec l'onde frontale. La dépression a par la suite contourné la NS pour séjourner dans le golfe du Saint-Laurent. La simulation a donc été capable de reproduire le système dépressionnaire occlus ainsi que sa trajectoire.

L'accumulation de précipitation à la surface entre le 24 et le 26 janvier inclusivement est ensuite étudiée. Pour que la précipitation horaire soit considérée dans le total de précipitation pour l'événement, le taux horaire doit correspondre minimalement à un taux journalier de 1 mm j^{-1} (Lambert et Hansen 2011), autrement la précipitation est considérée nulle. Les figures 3.8 à 3.12 montrent respectivement l'accumulation de précipitation totale, de pluie verglaçante, de pluie, de précipitations solides non

givrées et de précipitations solides givrées lors de la tempête. Les cercles des figures 3.8 et 3.9 représentent les valeurs des observations enregistrées aux stations d'ECCC. Le maximum de précipitation totale le long de la côte de la NS, de même que les intensités près de la Péninsule acadienne, le comté du Kent et Miramichi (fig. 3.8) ont été reproduits par le modèle. Le maximum de plus de 100 mm au centre du NB n'a cependant pas été reproduit, mais une réserve quant à la valeur enregistrée à cette station peut être posée considérant que les stations autour ont enregistrées des valeurs inférieures.

La figure 3.9 montre que le maximum de pluie verglaçante à Miramichi a bien été reproduit, de même que la distribution de pluie verglaçante le long de la côte du comté du Kent et de la Péninsule acadienne (selon les observations rapportées dans Wagner et NB 2017). La station à Bas-Caraquet ne montre cependant pas une accumulation aussi importante de pluie verglaçante. Les cas de Miramichi et de Bas-Caraquet seront donc étudiés plus en profondeur à l'aide des observations de surface. Le maximum de pluie verglaçante de la simulation se trouve dans la pointe est de la NS (Cap-Breton). Bien qu'il n'y ait pas de données d'observations pour l'accumulation totale de pluie et de précipitations solides, les figures 3.10 et 3.11 montrent que la pluie simulée a surtout affecté la NS et la moitié sud du NB alors que très peu de précipitations solides sont tombées au NB et en NS, à l'exception du nord-ouest du NB. La figure 3.12 montre que de faibles accumulations de précipitations solides givrées sont tombées lors de l'événement avec un maximum au nord du NB.

Bien qu'un radiosondage ne représente qu'un point particulier dans la simulation, il a été décidé de comparer le profil vertical de température et d'humidité simulé (fig. 3.13a) à celui observé (fig. 3.13b) à 0000 UTC 25 janvier. L'allure de la courbe de température est respectée, avec le nez d'air chaud à bas niveau. Puisque les données de la simulation ont été interpolées aux niveaux de pression standards (donc aucune donnée entre 850 et 700 hPa), le radiosondage simulé sur la figure ne montre pas

correctement l'aire de la couche chaude. Une différence plus marquante est la température en surface. La simulation est légèrement plus chaude en surface que pour le radiosondage observé. Cet aspect devra être pris en considération sur la limite entre les précipitations glacées et liquides.

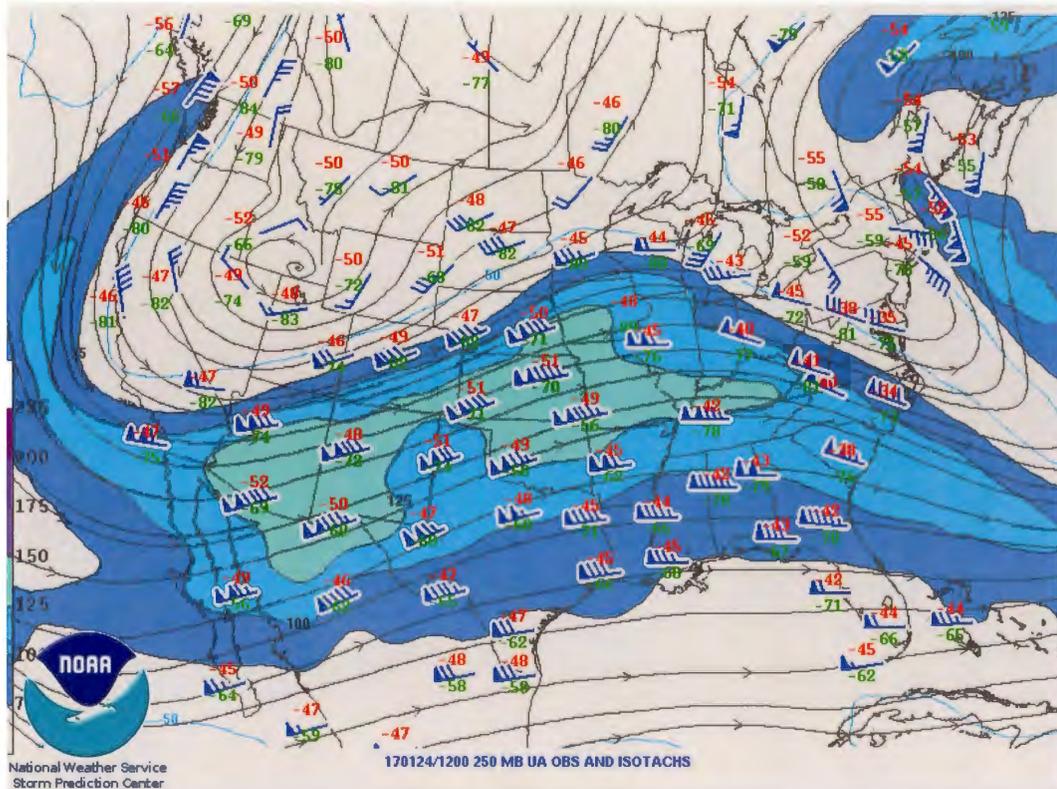


Figure 3.1 Carte d'analyse et d'observation à 250 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent l'écoulement du vent. Les contours de couleurs bleues et les traits continus cyan représentent les isotaques. Récupérée de <https://www.spc.noaa.gov/obs wx/maps/>.

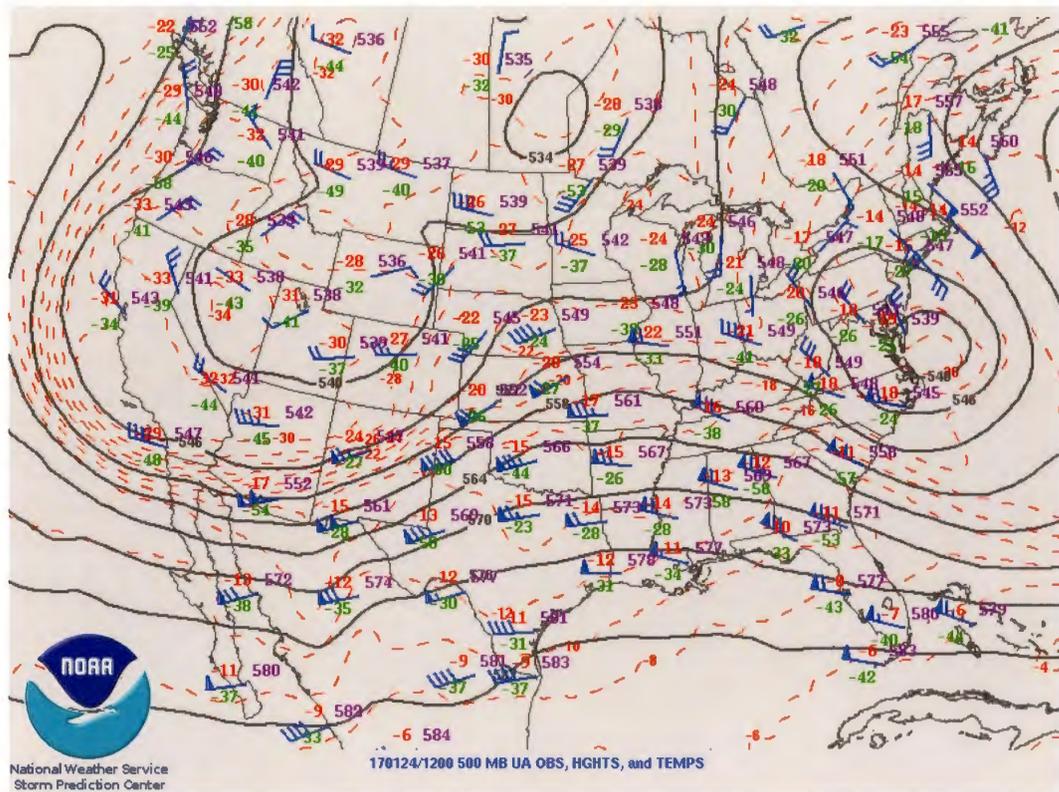


Figure 3.2 Carte d'analyse et d'observation à 500 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent les isohypses. Les traits pointillés rouges représentent les isothermes. Récupérée de <https://www.spc.noaa.gov/obswx/maps/>.

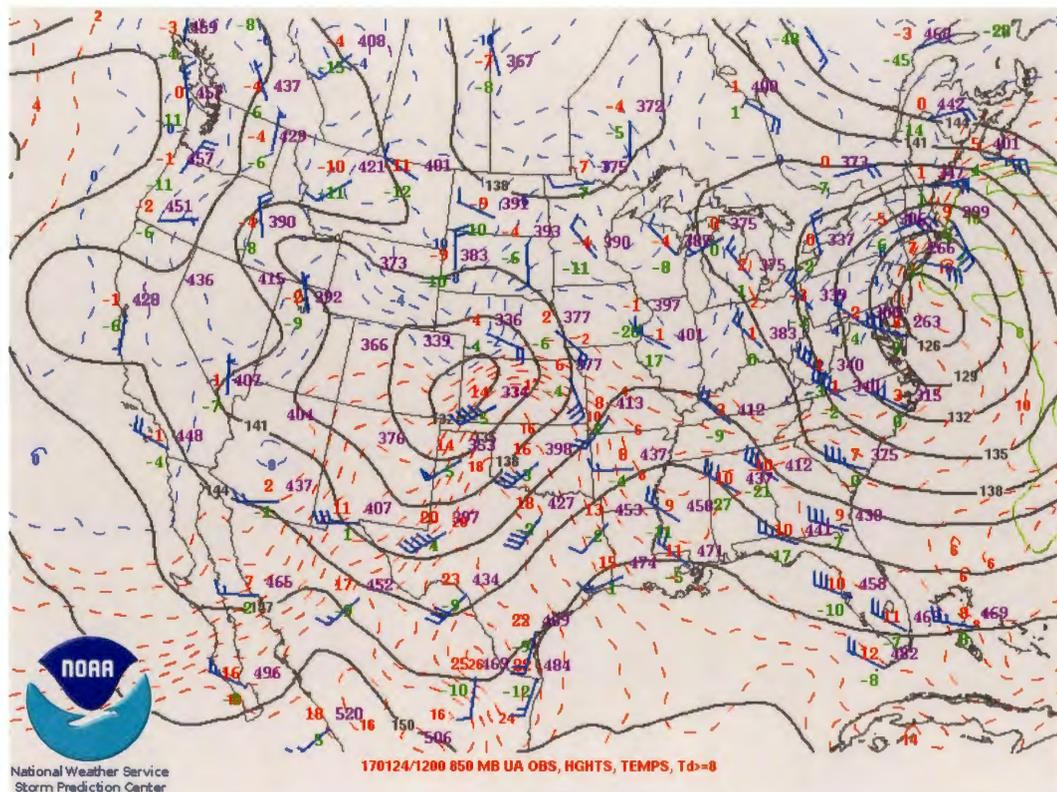


Figure 3.3 Carte d'analyse et d'observations à 850 hPa de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus noirs représentent les isohypses. Les traits pointillés représentent les isothermes, en bleu pour $T < 0^{\circ}\text{C}$, en rouge pour $T \geq 0^{\circ}\text{C}$. Les traits continus verts sont des lignes d'égaux température du point de rosée. Récupérée de <https://www.spc.noaa.gov/obs wx/maps/>.

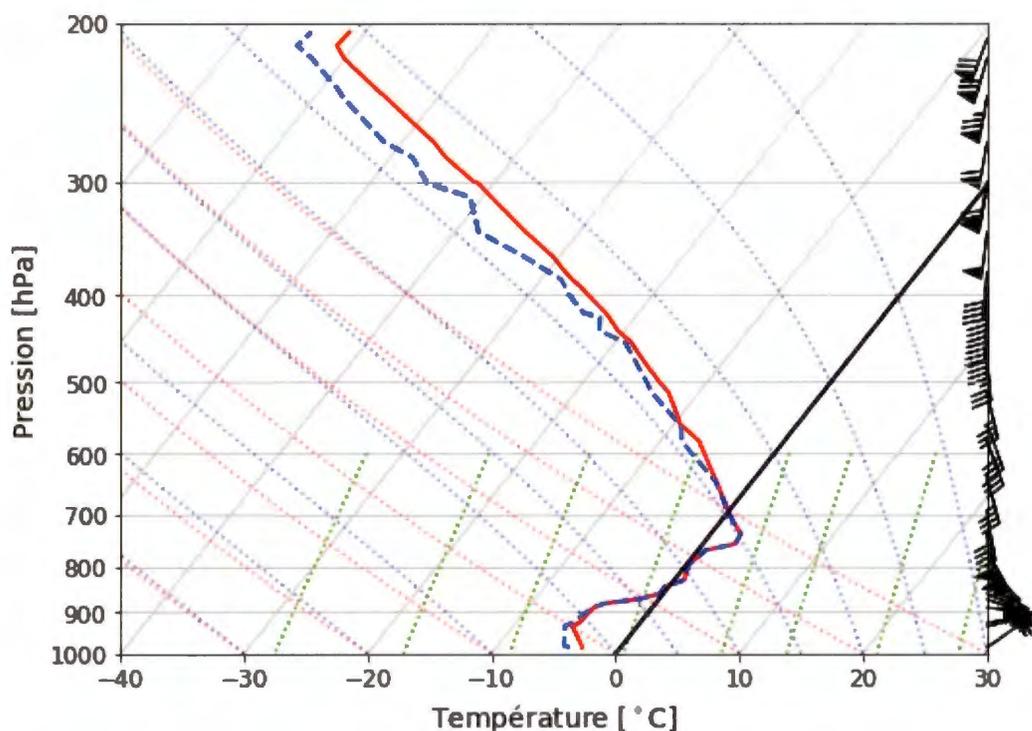


Figure 3.4 Radiosondage observé à 0000 UTC le 25 janvier 2017 à Caribou, Maine. La courbe rouge est le profil de température alors que la courbe bleue tiretée est le profil de la température du point de rosée. Les lignes guides du graphique sont : les isobares (lignes noires horizontales), les isothermes (lignes noires en diagonales), le rapport de mélange saturé (lignes pointillées vertes), les adiabatiques sèches (lignes pointillées rouges) et les adiabatiques humides (lignes pointillées bleues). (Données récupérées de UW <http://weather.uwyo.edu/index.shtml>).

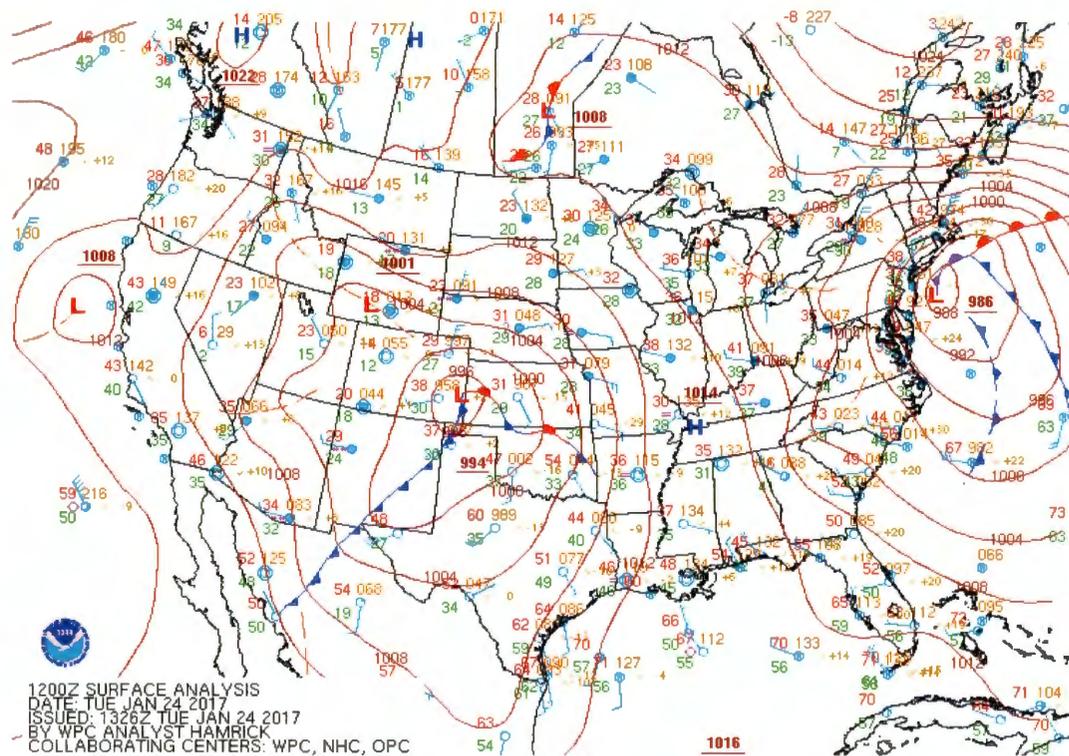


Figure 3.5 Carte d'analyse et d'observations de surface de la NOAA à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus bruns représentent les isobares. L'analyse frontale de la NOAA est représentée par les lignes bleues (fronts froids), les lignes rouges (fronts chauds), les lignes lilas (fronts occlus) et les lignes rouges et bleues (fronts stationnaires). Récupéré de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php.

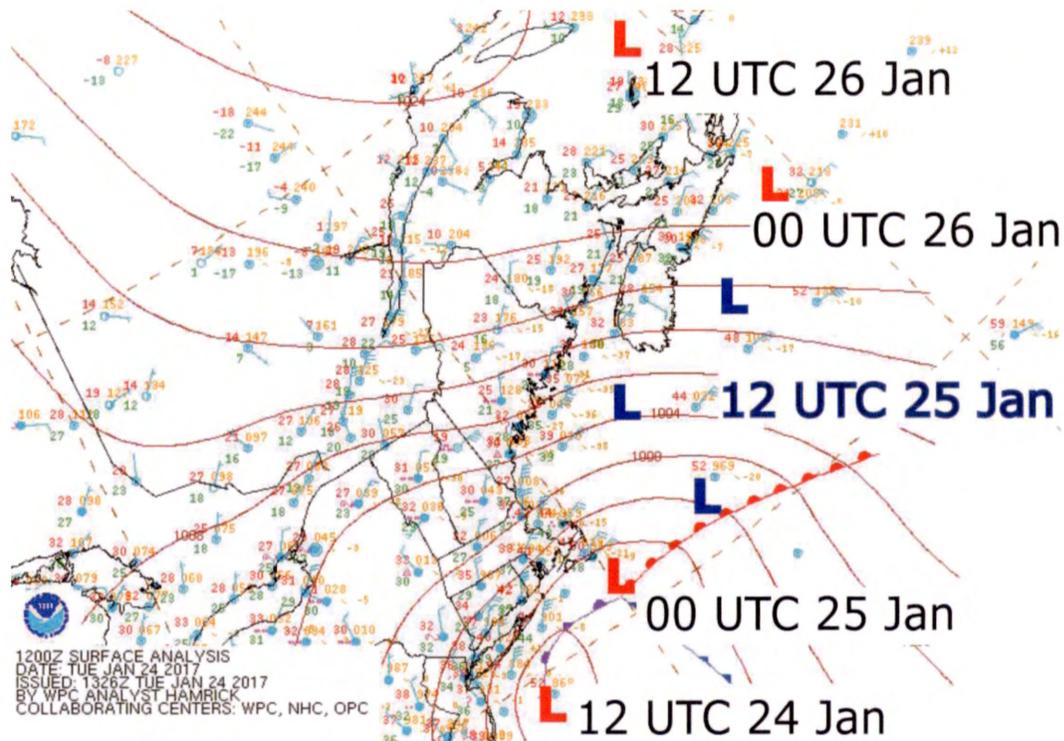


Figure 3.6 Trajectoire du centre dépressionnaire entre 1200 UTC le 24 janvier et 1200 UTC le 26 janvier 2017. NOAA. La carte de fond est la situation à 1200 UTC le 24 janvier. Les traits continus bruns représentent les isobares. L'analyse frontale de la NOAA est représentée par les lignes bleues (fronts froids), les lignes rouges (fronts chauds), les lignes lilas (fronts occlus) et les lignes rouges et bleues (fronts stationnaires). Carte de fond récupérée de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php.

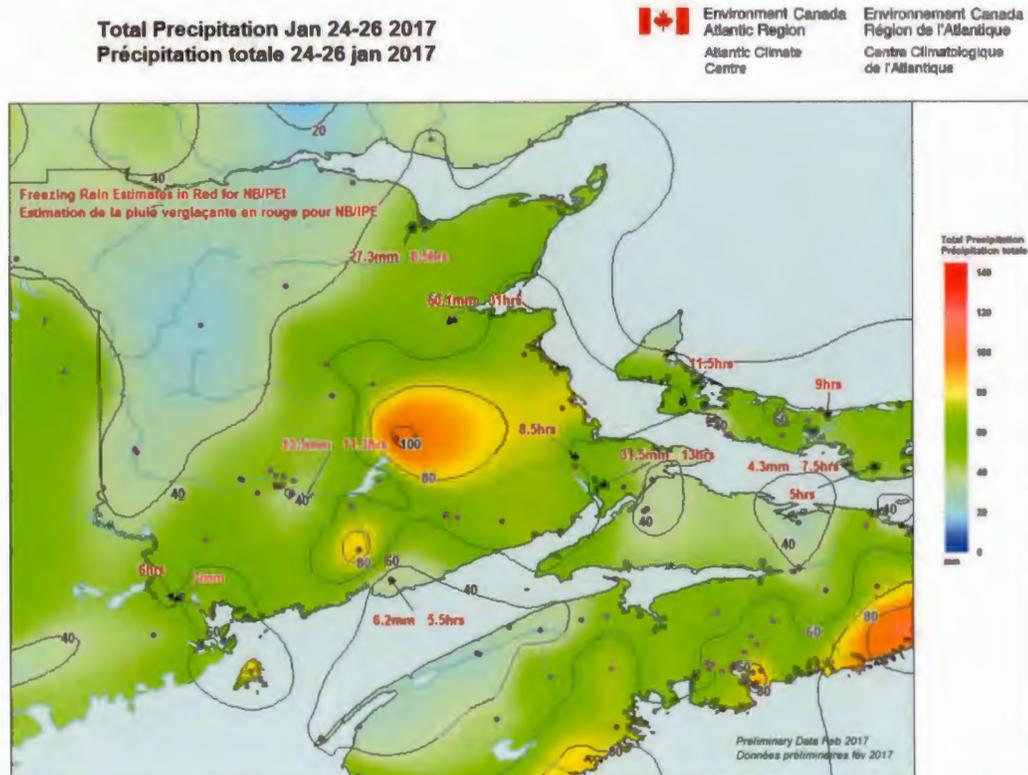


Figure 3.7 Carte d'analyse de la division de la région de l'Atlantique d'ECCE de l'accumulation totale de précipitation entre le 24 janvier et le 26 janvier 2017.

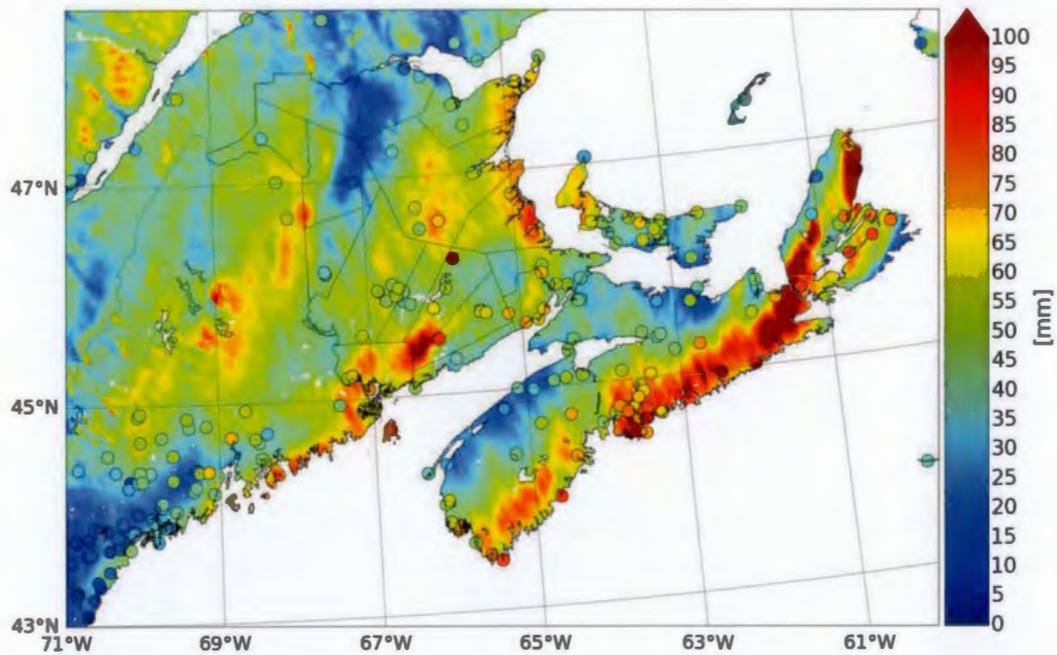


Figure 3.8 Accumulation totale de précipitation entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Les cercles représentent les données aux stations d'observations fournies par ESSDC. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

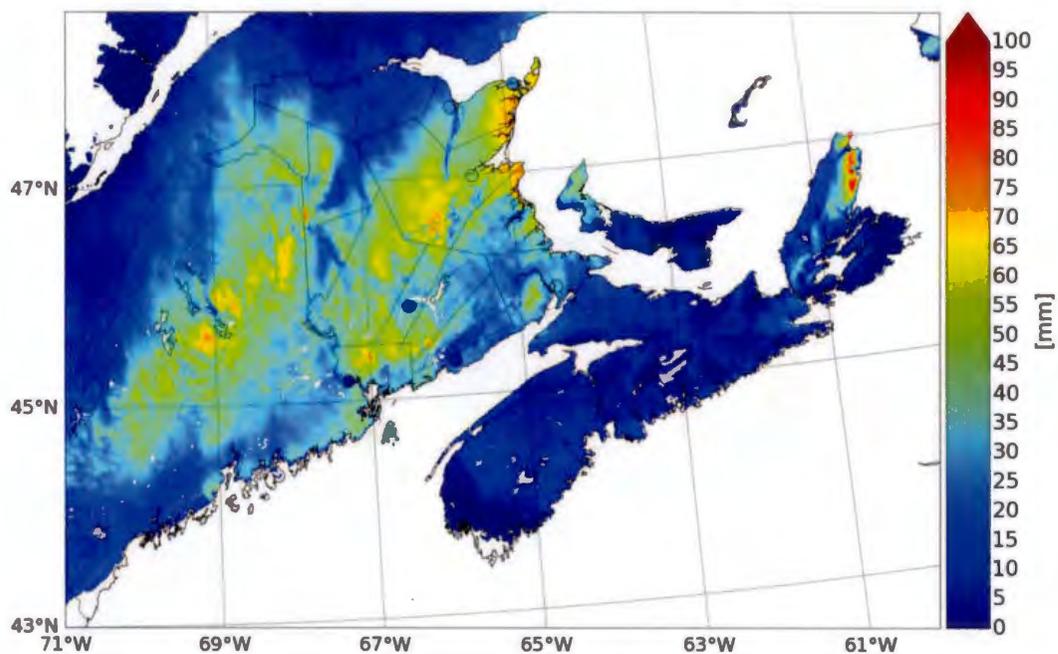


Figure 3.9 Accumulation totale de précipitation verglaçante entre le 24 et le 26 janvier 2017 diagnostiquée à partir de la simulation GEM4. Les cercles représentent les données aux stations d'observations d'ECCC. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

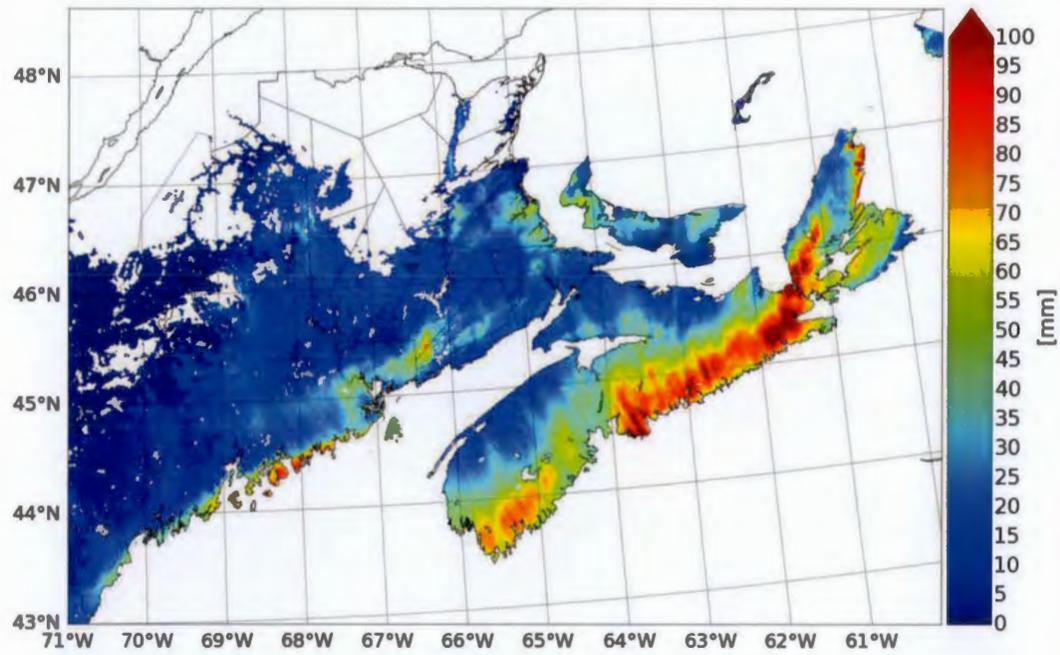


Figure 3.10 Accumulation totale de pluie entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

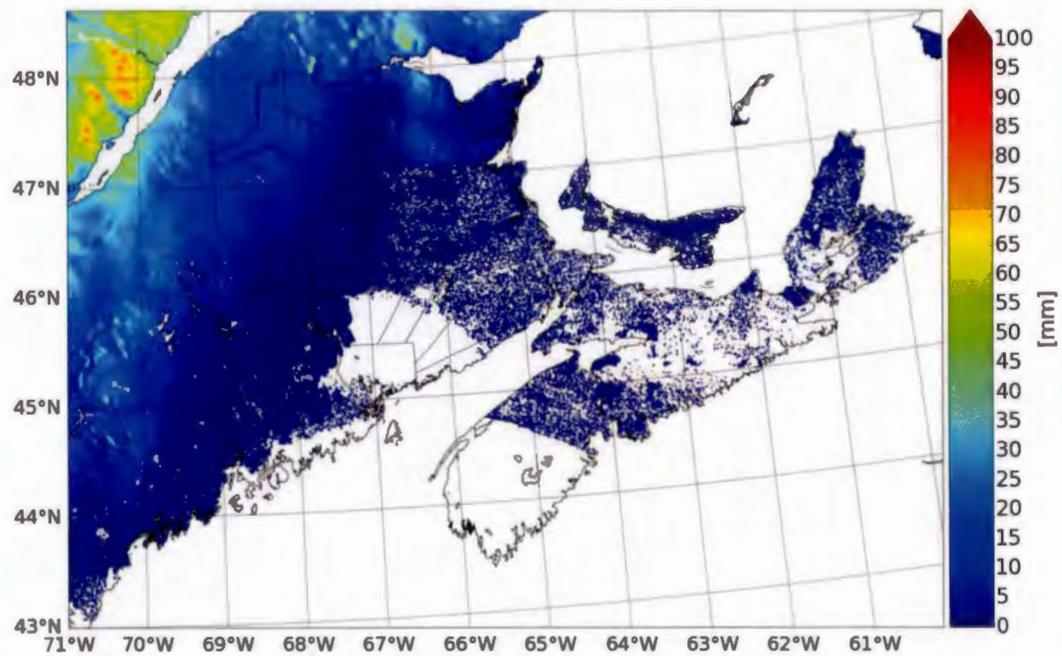


Figure 3.11 Accumulation totale de précipitation solide non givrée entre le 24 et le 26 janvier 2017 issue de la simulation GEM4. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

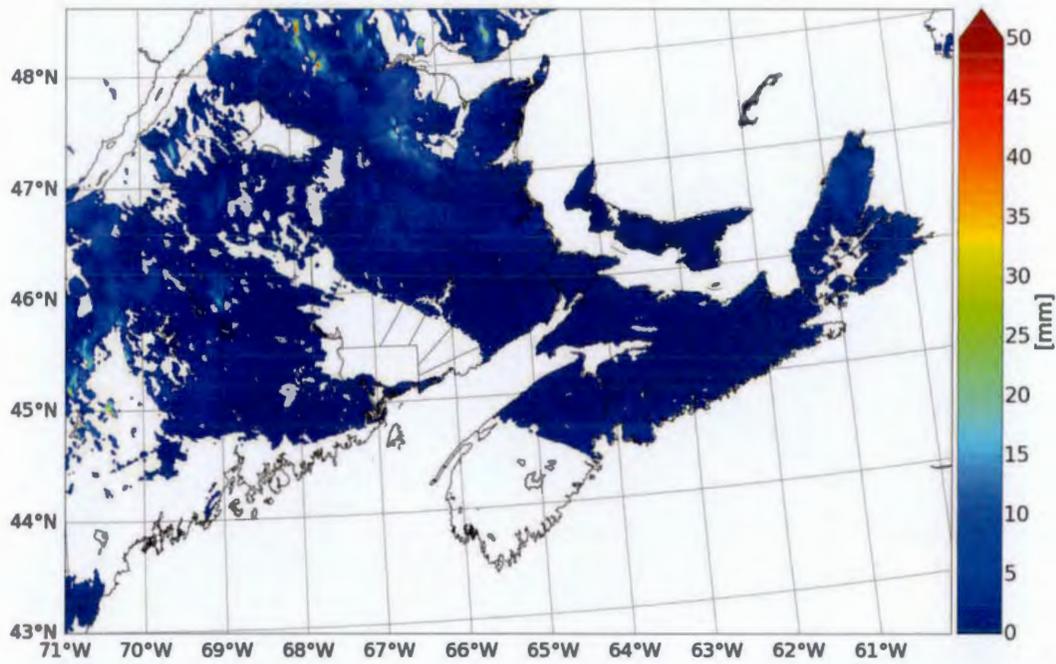


Figure 3.12 Accumulation totale de précipitation solide givrée entre le 24 et le 26 janvier 2017 diagnostiquée à partir de la simulation GEM4. Noter l'échelle différente des autres types de précipitation. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

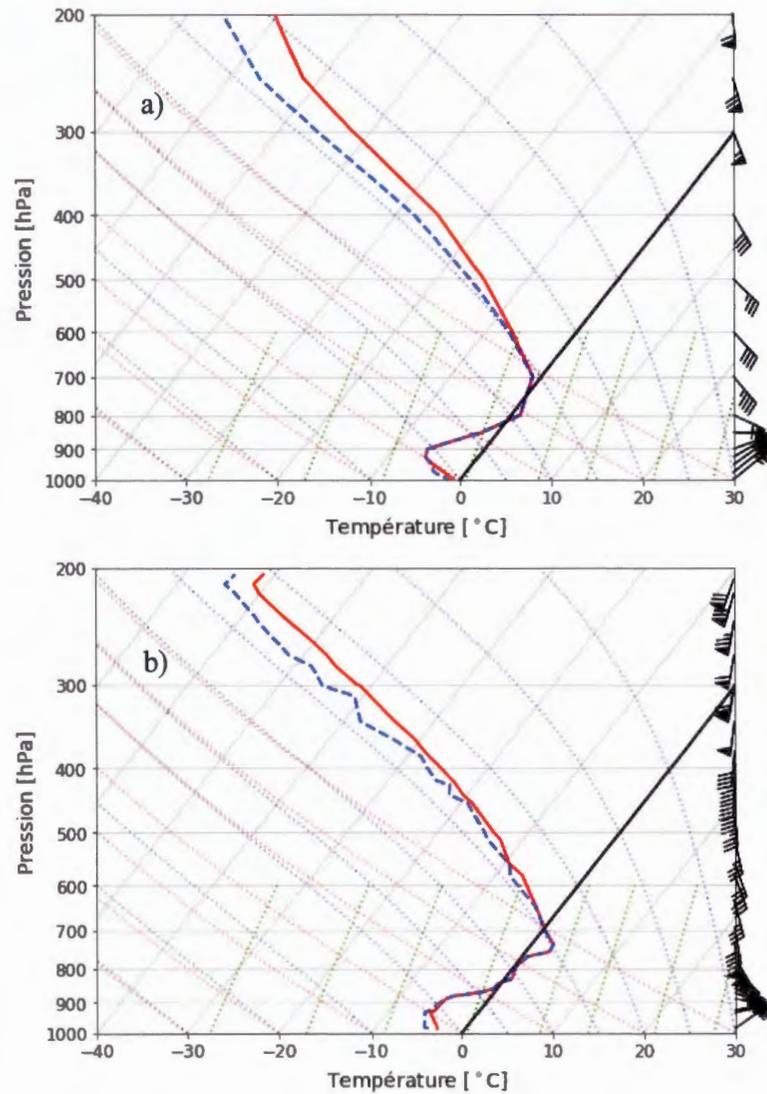


Figure 3.13 Radiosondage a) simulé et b) observé à 0000 UTC le 25 janvier 2017 à Caribou, Maine. La courbe rouge est le profil de température alors que la courbe bleue tiretée est le profil de la température du point de rosée. Données récupérées de UW <http://weather.uwyo.edu/index.shtml>.

CHAPITRE IV

CONDITIONS THERMODYNAMIQUES ET DYNAMIQUES

4.1 Procédés de formation des précipitations verglaçantes

Comme mentionné précédemment, le processus de fonte joue un rôle important dans la formation de la pluie verglaçante et du grésil. Il est de plus possible de former de la pluie verglaçante par condensation de vapeur d'eau (méthode nonclassique) plutôt que par la fonte d'une particule glacée (méthode classique). Les taux de précipitation sont cependant plus faibles et de la bruine verglaçante est souvent produite. Cette section vise à déterminer l'importance relative des deux procédés de formation de la pluie verglaçante lors de la tempête du 24 au 26 janvier 2017.

Tout d'abord, l'épaisseur de la couche de fonte (calculée à partir des données de la simulation) et son évolution sont représentées sur les figures 4.1 à 4.3, de même que le type de précipitation associé entre la pluie verglaçante et le grésil. Une distinction est faite entre la précipitation verglaçante avec une couche de fonte (couleur verte) et celle sans couche de fonte (couleur bleue), alors que la couleur mauve représente le grésil diagnostiqué en surface. Les épaisseurs sont représentées par les lignes de contour de couleurs chaudes. La figure 4.1 montre la situation au début des précipitations sur le NB à 1200 UTC le 24 janvier. On peut remarquer une bande de grésil à l'avant des précipitations et une zone de mélange avec la pluie verglaçante. L'épaisseur de la couche de fonte pour le grésil est sous 1500 m pour la majorité des lieux.

Avec le temps, les précipitations se déplacent vers le nord-est. À 0000 UTC le 25 janvier (fig. 4.2), la bande de grésil se retrouve au-dessus du comté du Kent et au-dessus de Miramichi. L'étendue de la pluie verglaçante est importante sur le NB et une bande de pluie verglaçante sans couche de fonte s'est formée principalement au nord-ouest des précipitations. Deux explications sont possibles : soit la précipitation verglaçante s'est formée par condensation de vapeur d'eau, soit ces gouttelettes d'eau ont été advectées par le vent en altitude à la suite de la fonte des particules de glace. Il est intéressant de noter que les lignes d'épaisseur de la couche de fonte sont orientées parallèlement à la côte sud du NB à ce moment.

Les précipitations sous forme de grésil comme de pluie verglaçante ont longuement affecté la Péninsule acadienne et la ville de Miramichi entre 0000 UTC le 25 janvier et 1000 UTC le 26 janvier. Après être monté jusqu'au-dessus de la Péninsule acadienne, le patron des lignes d'égales épaisseurs est resté similaire, traversant le NB du sud-ouest au nord-est. Il a par la suite pivoté dans une orientation presque nord-sud vers 0000 UTC le 26 janvier (fig. 4.3) tout en restant au-dessus de la Péninsule acadienne et offrant des conditions idéales de fonte pour générer de la pluie verglaçante. Durant ces moments, de la pluie verglaçante avec et sans couche de fonte a été simulée.

De la bruine verglaçante a également été enregistrée à diverses stations de surface d'ECCC lors de l'événement. Considérant que le mode de formation typique de la bruine verglaçante ne comprend pas de fonte de particule de glace en altitude (Rauber et al. 2000), une étude du diamètre moyen des gouttelettes de pluie a été réalisée. Le diamètre moyen volumique peut être calculé grâce aux variables de sortie du rapport de mélange massique pour la pluie (q_r), du nombre total de gouttes par mètre cube d'air sec (N_r), de la densité de l'air sec (ρ) et de la densité de l'eau (ρ_r) par la relation suivante (Straka 2011):

$$D = \sqrt[3]{\frac{6\rho q_r}{\pi\rho_r N_r}} \quad (4.1)$$

Un diamètre inférieur à 0,5 mm est classé comme de la bruine alors qu'un diamètre de 0,5 mm ou plus est désigné comme de la pluie.

Les figures 4.4 à 4.6 montrent l'évolution du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante. De façon générale, la simulation montre que la pluie verglaçante était surtout associée avec un plus fort taux de précipitation (figures en annexe A) et la présence d'une couche de fonte. De même, les diamètres moyens les plus importants sont non loin de la transition avec le grésil et la neige. La bruine verglaçante quant à elle était surtout près de la transition avec la pluie, de même que les plus faibles taux de précipitation. Les figures 4.3 et 4.6 mettent en relief l'importance de la méthode classique et non-classique pour obtenir de la bruine verglaçante lors de cette tempête.

4.2 Coupe verticale au travers du front chaud

Afin d'étudier les conditions thermodynamiques en altitude lors de la tempête, une coupe verticale a été réalisée. L'emplacement choisi pour réaliser cette coupe verticale permet de montrer la position du front chaud en altitude tout en maximisant la couverture dans les zones les plus touchées, notamment la ville de Miramichi et le comté du Kent. La coupe verticale a donc une orientation sud-est au nord-ouest à travers la NS et le NB. Le tout est représenté sur la figure 4.7. L'axe des abscisses représente la distance par rapport à la ville de Miramichi, en kilomètre, partant du sud-est à gauche jusqu'au nord-ouest à droite de la figure. L'emplacement de Miramichi est visuellement rehaussé par une ligne verticale au kilomètre 0.

4.2.1 Conditions météorologiques de la coupe verticale

L'évolution de la température, des vents horizontaux (fig. 4.8) et de l'humidité relative (fig. 4.9) dans la coupe verticale est discutée dans cette section. Les vents horizontaux à 1300 UTC le 24 janvier (fig. 4.8a) sont principalement d'est en dessous de 3000 m et du nord-est près de la surface. L'intrusion d'air chaud est apparente au sud-est de la coupe alors que le front chaud associé à la dépression se rapproche. L'humidité relative (fig. 4.9a) est alors inférieure à 70 % sauf près de la surface et en altitude au sud de la coupe. Jusqu'à 2000 UTC le 24 janvier (fig. 4.8b), l'intrusion d'air chaud continue de se déplacer vers le nord et s'étend sur 525 km de manière presque continue. Son épaisseur reste cependant en dessous de 1000 m au-dessus de Miramichi. Les vents prennent de l'intensité et tournent de plus en plus pour devenir du sud-est avec l'avancement vers le nord de la couche chaude. L'humidité relative (fig. 4.9b) augmente avec l'arrivée des précipitations pour atteindre 100 % par endroit mais l'air dans des portions de la couche de fonte reste sec. Cet air sec peut résulter en couche d'air chaud plus mince, ce qui impacte le processus de fonte et permet en outre davantage de particules solides de se rendre à la surface (Thériault et al. 2018).

La couche chaude devient par la suite moins étendue le long de la coupe, couvrant une distance d'environ 275 km. Elle s'épaissit jusqu'à atteindre une épaisseur de 2000 m par endroit. Les figures 4.8c et 4.9c, de l'état de la situation à 0900 UTC le 25 janvier, sont représentatives du patron simulé entre 0000 UTC et 2300 UTC le 25 janvier. Durant cette période, les vents en surface conservent une orientation du nord-est ce qui peut avoir contribué à maintenir les températures sous le point de congélation en dessous de la couche de fonte. Bien que le couvert de glace soit faible sur le golfe du Saint-Laurent (annexe B) à cette date, il pouvait bien être suffisant pour maintenir une température en surface sous le point de congélation. Les eaux dégagées ont pu cependant permettre d'augmenter l'influx d'humidité en provenance du Golfe, augmentant à son tour l'accrétion de glace sur les structures. Les vents en

altitude dans la couche chaude ont, quant à eux, tourné du sud, puis finalement de l'ouest vers 2200 UTC le 25 janvier (nonmontrée). L'air reste saturé, de la couche chaude en altitude jusqu'à la surface. Quelques intrusions d'air plus sec apparaissent au sommet de la couche de fonte durant cet intervalle, suggérant que des changements de phase ont lieu.

À 0000 UTC le 26 janvier, l'intrusion d'air chaud se retire vers le sud. Les vents près de la surface sous l'inversion, qui étaient alors du nord, pivotent vers l'ouest. L'air s'assèche en altitude mais reste près de la saturation vers la surface. À noter qu'après le retrait de l'intrusion d'air chaud en altitude vers 1400 UTC le 26 janvier, les températures à la surface (fig. 4.8d) remontent au-dessus du point de congélation le long de la coupe. Cette situation peut avoir eu un impact sur le réseau électrique et les branches des arbres en permettant la fonte de la glace accumulée. Une mince bande saturée (fig. 4.9d) à la hauteur de 1000 m peut suggérer l'apparition de nuages stratiformes.

4.2.2 Types de précipitation

Une évaluation de la forme des particules en altitude de même que le type de précipitation résultant à la surface est faite le long de la coupe verticale durant l'événement. Au début des précipitations en surface vers 1300 UTC le 24 janvier (fig. 4.10), il est possible de remarquer que les précipitations, alors sous forme de grésil (fig. 4.10c), débutent par le sud-est. Les rapports de mélange de glace (fig. 4.10a) et de pluie (fig. 4.10b) montrent que des particules glacées se trouvaient en altitude jusqu'au sol au-dessus de la zone de grésil, et qu'il y avait bien une couche de fonte par la présence de particules liquides. Les particules glacées à l'avant du système en altitude démontrent également la présence de nuages hauts et possiblement de virga. Ceci correspond bien à la zone sèche telle que rehaussée par la figure 4.5a.

La figure 4.11 montre la situation à 0000 UTC le 25 janvier. On peut observer que l'intrusion d'air chaud progresse davantage vers le nord et atteint Miramichi. La simulation a bien recréé la transition des types de précipitations (fig. 4.11c), passant de la neige au nord du front chaud, au grésil, à la pluie verglaçante et puis finalement à la pluie au sud. La coupe verticale du rapport de mélange de glace (fig. 4.11a) et de la pluie (fig. 4.11b) montre les particules glacées se rendant en surface au nord de Miramichi. La limite neige/grésil de la simulation montre bien le début de l'intrusion d'air chaud mais également de la présence de gouttes de pluie (fig. 4.11b). Plus au sud de Miramichi, la couche de fonte est plus épaisse et on observe une augmentation du rapport de mélange de la pluie. Entre 50 et 150 km au sud-est de Miramichi, l'air reste froid sous l'inversion chaude et on retrouve de la pluie verglaçante en surface (fig. 4.11c).

Bien que la situation évolue à 0900 UTC le 25 janvier (figure 4.12), les précipitations verglaçantes sont encore présentes sur une large distance autour de Miramichi. Le rapport de mélange de glace (figure 4.12a) est au plus haut ce qui donne un taux de précipitation pour la pluie verglaçante (figure 4.12 b et c) autour de 6 mm h^{-1} . La ville de Miramichi est toujours affectée. Un fait intéressant est l'intrusion de particules glacées à 75 km au nord-ouest de Miramichi, sous la couche de fonte. En surface, un mélange de neige ou de grésil avec la pluie verglaçante a été simulé. Dans la réalité, des interactions entre les différents types de précipitations peuvent réduire la quantité de pluie verglaçante à cet endroit en faveur de particules givrées ou de grésil de type B.

Par la suite, les précipitations deviennent presque entièrement liquides après 1800 UTC le 25 janvier (nonmontrée) à l'exception du nord de la coupe où des précipitations sous forme de neige sont encore simulées. Les précipitations cessent vers 0900 UTC le 26 janvier.

4.2.3 Distribution de tailles des particules glacées

La force du schéma microphysique P3 utilisé dans la simulation GEM4 est sa capacité à représenter toutes les particules de glace sous une même catégorie, et donc, une même distribution de taille (Morrison et Milbrandt 2015). Les particules givrées se rendant à la surface lors de l'événement peuvent être du grésil, de la neige roulée ou encore n'être que partiellement givrées. Par ailleurs, Cholette et al. (2019) ont ajouté le processus de la fonte partielle de la glace afin de permettre de simuler le regel menant au grésil. Dans les figures 4.10 à 4.12, le grésil diagnostiqué à la surface n'avait seulement traversé qu'une mince couche chaude avec une température n'excédant pas 1 °C. On peut se demander si les particules de glace ont eu le temps de fondre suffisamment pour donner du grésil ou si ce sont plutôt des particules partiellement givrées qui ont été transportées vers le sud. Deux moments où du grésil a été diagnostiqué à Miramichi sont analysés plus en profondeur.

Avec la fraction de givrage (F_{rim}), donnée par le rapport entre q_{rim} et q_i , il est possible de connaître les endroits où des particules givrées se trouvent. Les figures 4.13 et 4.14 superposent le rapport de mélange de la glace (a), la fraction givrée (b) et le taux de précipitation selon le type (c) à deux différents instants. À 2300 UTC le 24 janvier (fig. 4.13) et à 0200 UTC le 25 janvier (figure 4.14), on remarque que la fraction de givrage augmente dans et sous la couche de fonte. Les particules restent grandement, voir totalement givrées jusqu'en surface. Cette augmentation correspond bien avec la distribution du grésil diagnostiqué autour de Miramichi.

Afin de regarder l'évolution du givrage des particules lors de la fonte et du regel, la distribution de la taille des particules glacées a été réalisée à différents points au-dessus de Miramichi (fig. 4.15 et 4.16). Le point A est au-dessus de la couche de fonte à 3000 m, le point B est dans la couche de fonte à 1900 m, le point C est sous la

couche de fonte à 1000 m et le point D est à la surface. Dans le coin supérieur droit des figures, on peut noter les fractions de givrage et les densités de givrage de chaque point de donnée.

Tout d'abord, la figure 4.15 des données à 2300 UTC le 24 janvier montre que, de façon générale, il y a plus de particules de petite taille au-dessus de la couche de fonte et que ce nombre diminue durant la descente. Cette constatation n'est pas étonnante car les plus petites particules de glace devraient fondre les premières. De plus, en comparant les droites A et B, on remarque que le diamètre maximal diminue également. Il n'y avait initialement aucune particule givrée au point A alors qu'au point B, la fraction de givrage est de 0,31 et la densité de givrage est de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$. Les températures n'excédant pas $1 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la couche de fonte à ce moment, le processus de givrage s'est produit dans des conditions où les particules glacées sont devenues trempées d'eau. Leur densité a donc grandement augmenté.

On dénote cependant une augmentation du diamètre maximal de la distribution de particules en dessous de la couche de fonte. Ceci peut être dû à l'accrétion des gouttelettes d'eau surfondues aux particules glacées ou même à l'agrégation des particules de glace. Le nombre de grosses particules glacées augmente également à mesure qu'on se rapproche de la surface, ce qui peut supporter l'idée de l'agrégation de particules glacées entre elles. Les fractions de givrages en C et D montrent que les particules glacées étaient en grande partie complètement givrées et les densités de givrages suggèrent que le type était du grésil.

La figure 4.16 montre les données à 0200 UTC le 25 janvier. À ce moment, la couche chaude est plus épaisse et Miramichi reçoit un mélange de grésil et de pluie verglaçante. Comparativement à la figure 4.15, on peut remarquer qu'il y avait des particules givrées au-dessus de la couche de fonte au point A (ceci sera discuté dans le prochain paragraphe) mais également qu'il y avait plus de petites particules glacées près de la surface au point D que sous la couche de fonte au point C. Bien que la

fraction de givrage augmente entre le point C et le point D, la densité de givrage diminue. Il est possible, dans ce cas, que des petites particules partiellement givrées de plus faibles densités aient été advectées sous la couche de fonte, ce qui a affecté la distribution de taille des particules glacées.

À noter que des particules givrées sont aussi présentes près du sommet de la couche de fonte à plusieurs moments. Ceci est sûrement dû à la présence de mouvements ascendants liés à l'instabilité thermodynamique au sommet de la couche chaude. Cette instabilité est associée au refroidissement dû à la fonte de la neige au sommet de la couche d'air chaud (Stewart et al. 1984 ; Pruppacher et Klett 1997). La figure 4.17a montre le mouvement vertical de l'air (terme ω) ainsi que le rapport de mélange pour les nuages à 2000 UTC le 24 janvier. On remarque que, vers le sud-est de la coupe, le mouvement vertical est vers le haut au sommet de la couche de fonte et entraîne des gouttelettes de nuages plus haut. Le même effet est visible sur la figure 4.17b à 0900 UTC le 25 janvier. Une forte quantité de gouttelettes d'eau est transportée vers le haut au sommet de la couche de fonte entre 100 km au sud de Miramichi et 50 km au nord. La collection des gouttelettes de nuages par les cristaux de glace présents a donné des particules givrées au-dessus de la couche de fonte.

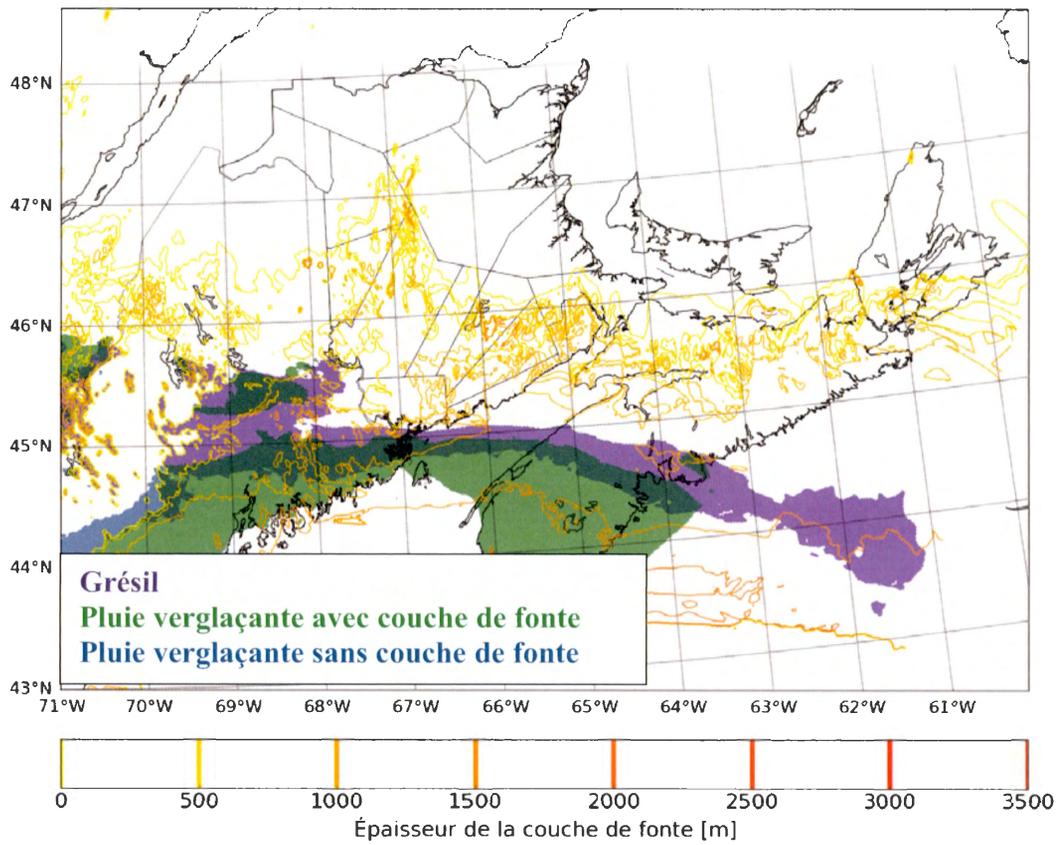


Figure 4.1 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 1200 UTC le 24 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

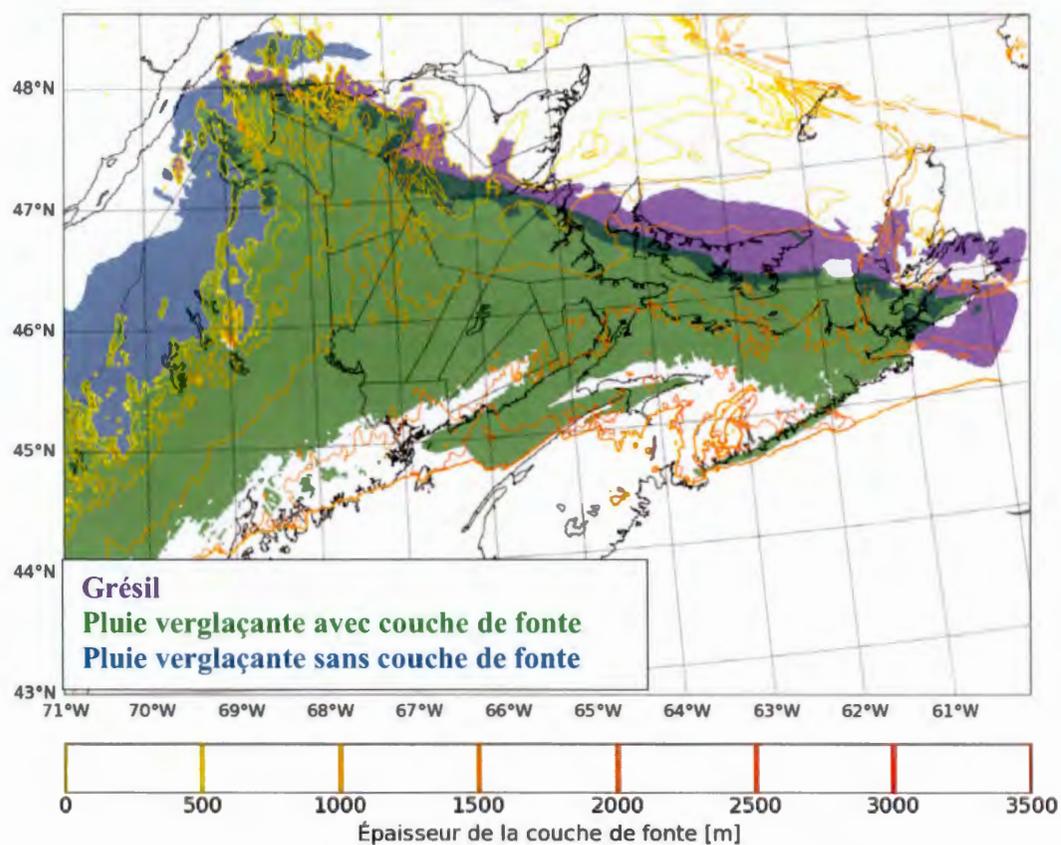


Figure 4.2 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 0000 UTC le 25 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

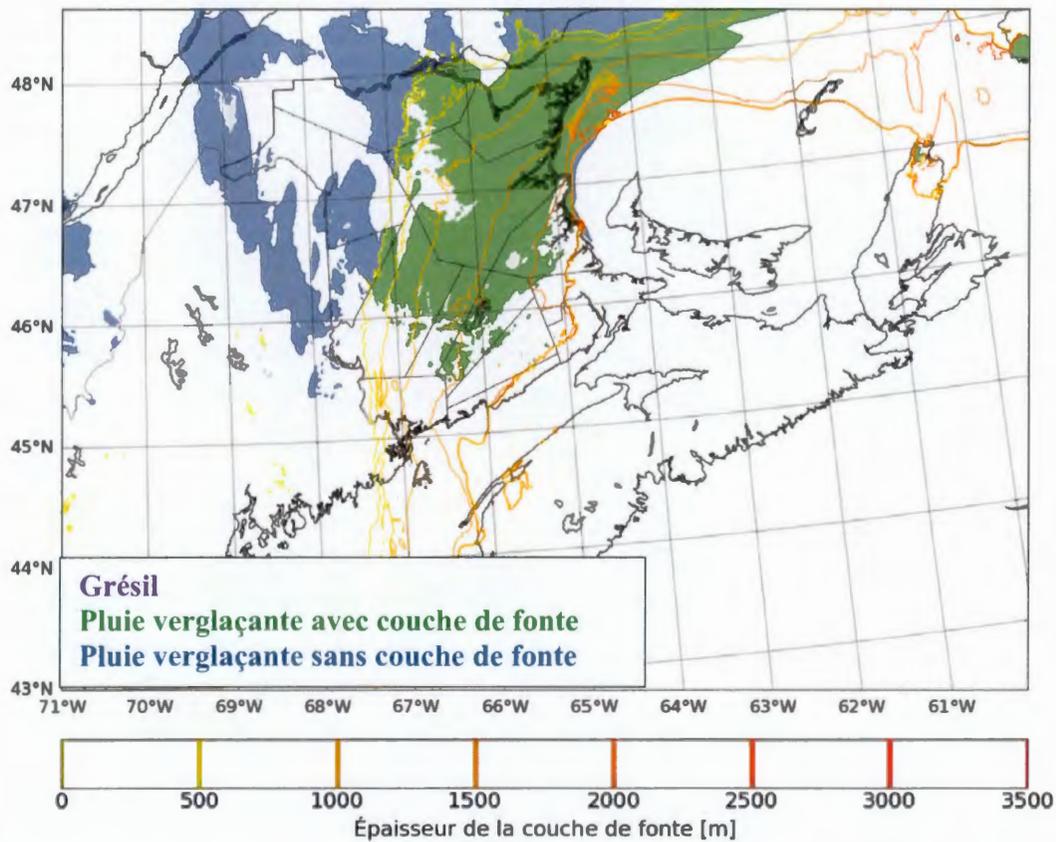


Figure 4.3 Carte de l'épaisseur simulée de la couche de fonte en relation avec les précipitations verglaçantes et le grésil à 0000 UTC le 26 janvier. Les blocs de couleurs représentent le type de précipitation avec la pluie verglaçante avec couche de fonte (en vert), la pluie verglaçante sans couche de fonte (en bleu) et le grésil (en mauve). Un effet de transparence a été appliqué afin de voir le chevauchement entre la pluie verglaçante et le grésil. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

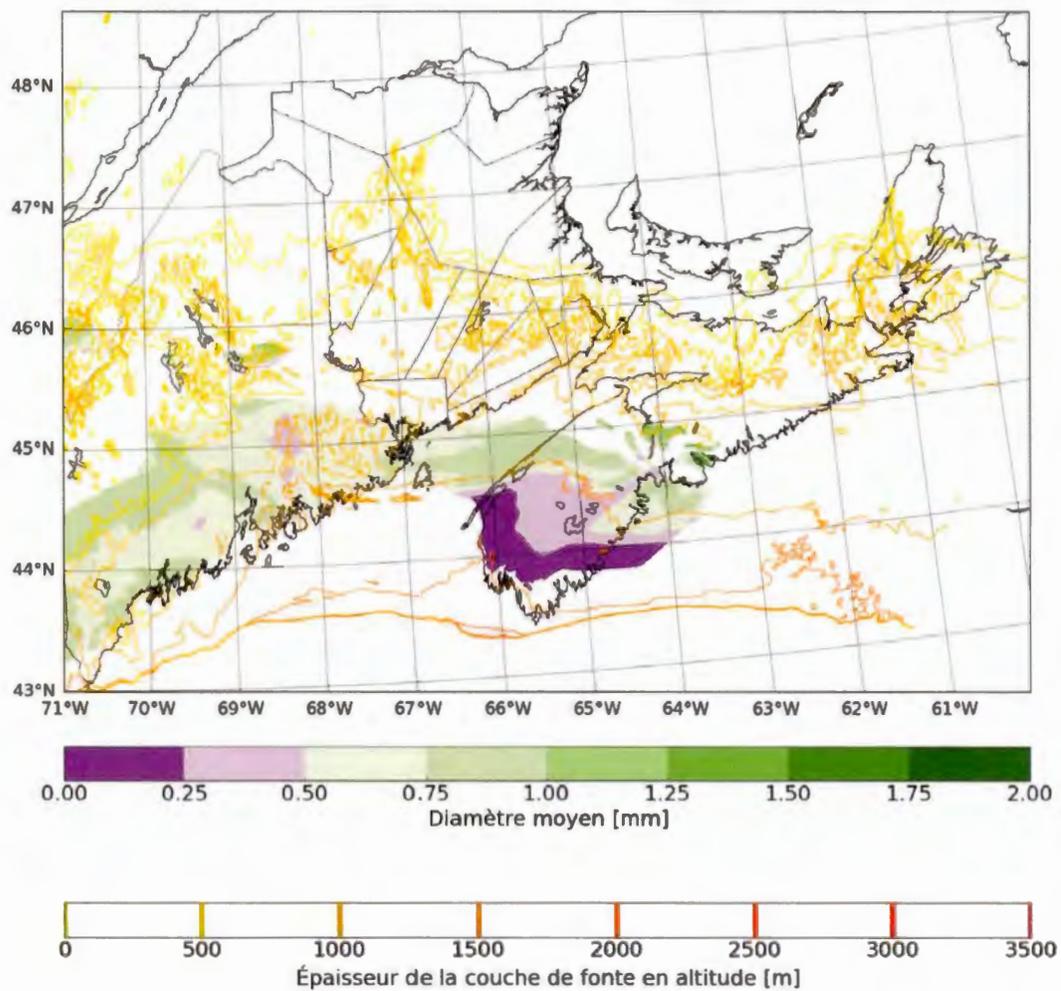


Figure 4.4 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 1300 UTC le 24 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

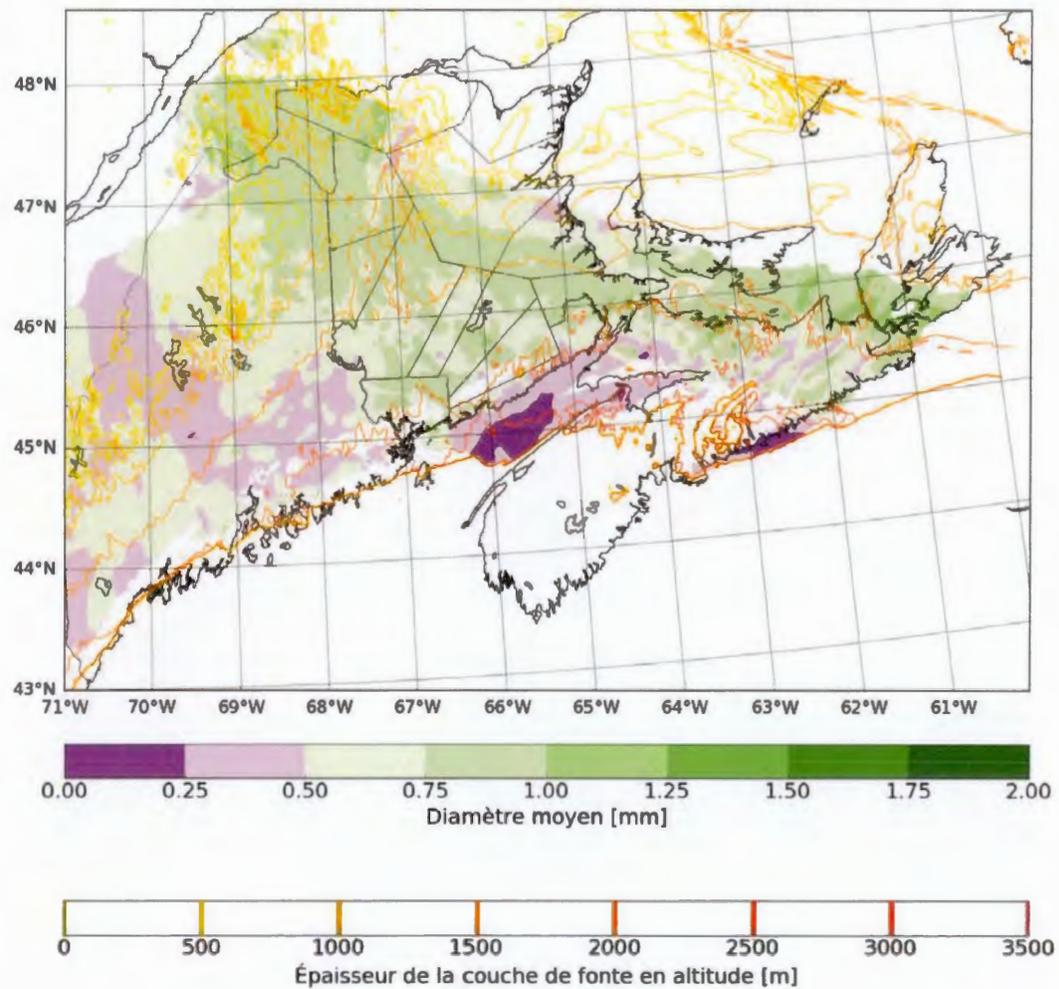


Figure 4.5 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 0000 UTC le 25 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

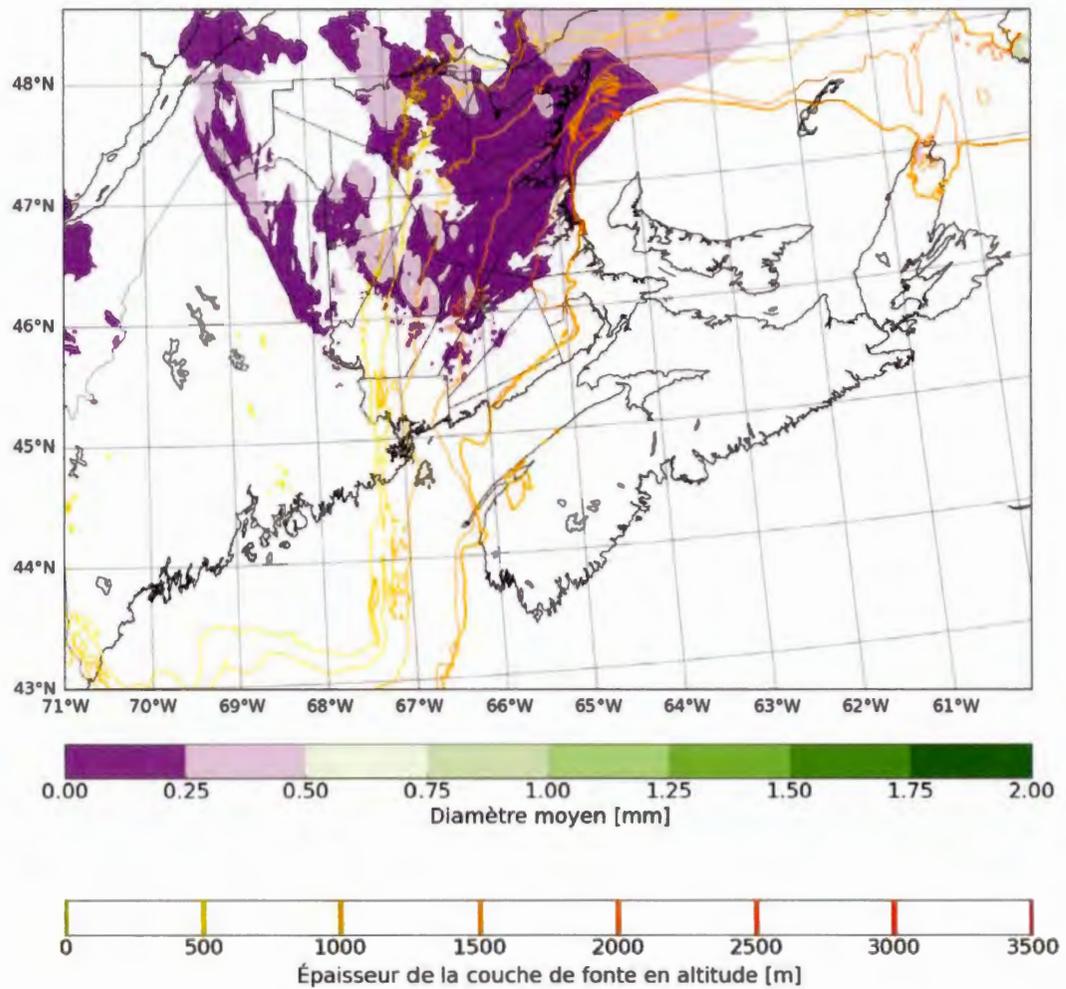


Figure 4.6 Carte du diamètre moyen des gouttelettes de pluie verglaçante à 0000 UTC le 26 janvier, calculé à partir des données de la simulation. Un rayon inférieur à 0,5 mm (couleur mauve) représente de la bruine verglaçante. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005).

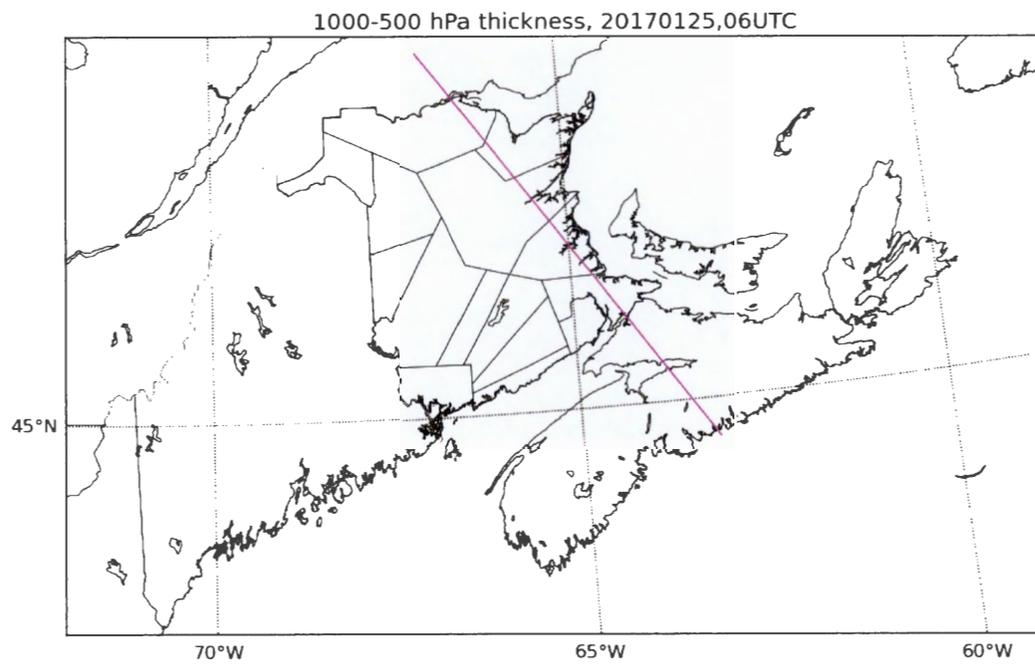


Figure 4.7 Emplacement de la coupe verticale faite au travers de la NS, du NB et du Québec. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GéoNB (NB 2005).

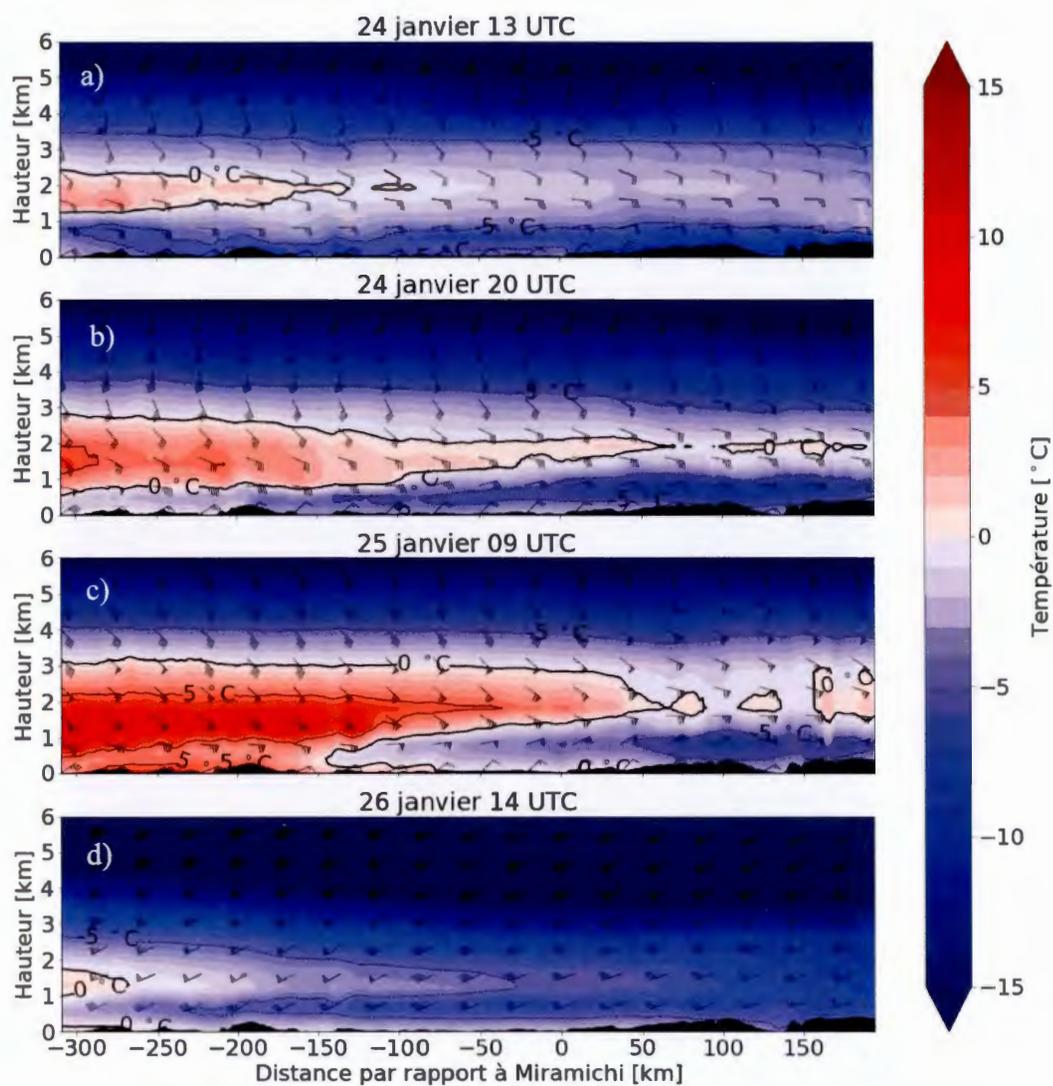


Figure 4.8 Coupe verticale de la température et du vent horizontal simulés par le modèle GEM4 à a) 1300 UTC le 24 janvier, b) 2000 UTC le 24 janvier, c) 0900 UTC le 25 janvier et d) 1400 UTC le 26 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

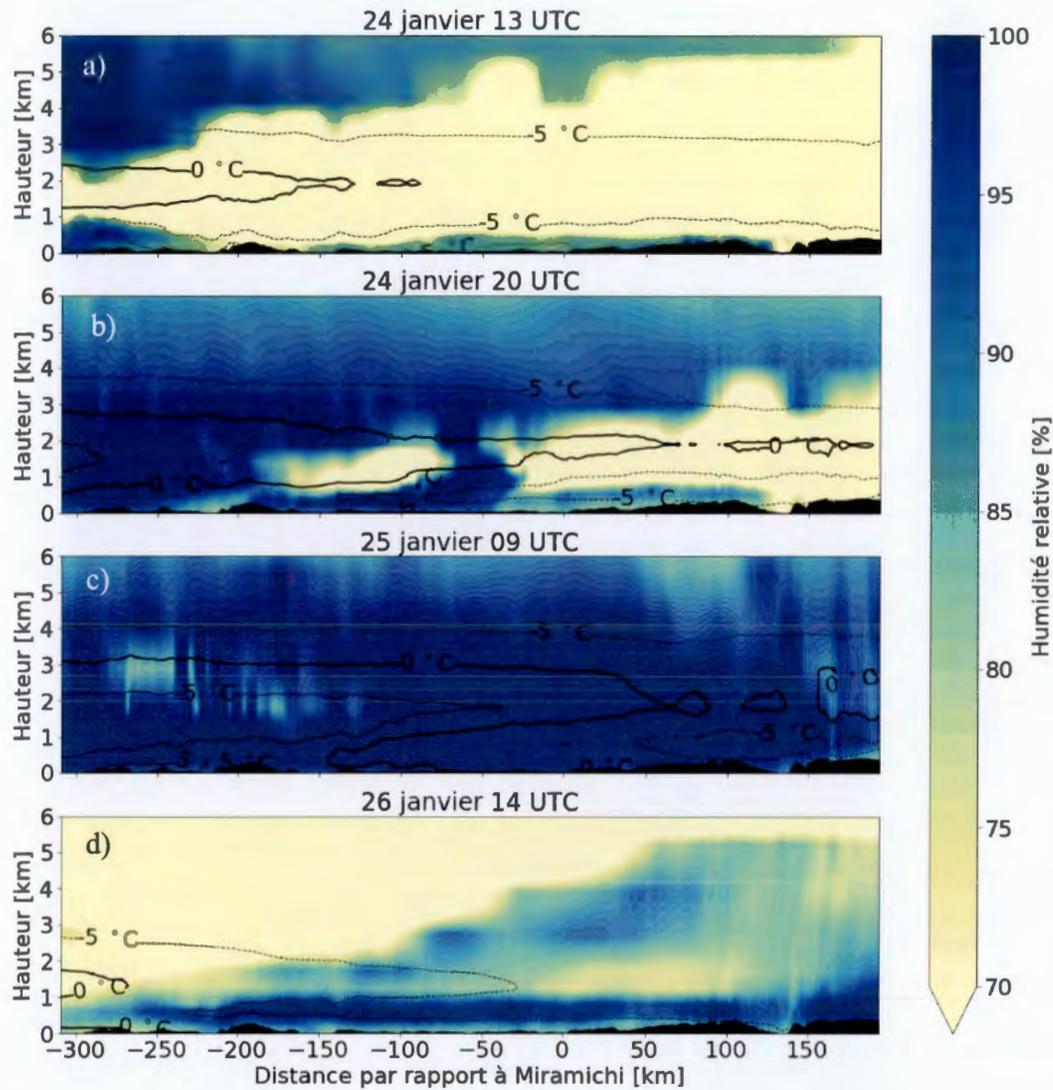


Figure 4.9 Coupe verticale de l'humidité relative simulée par le modèle GEM4 à a) 1300 UTC le 24 janvier, b) 2000 UTC le 24 janvier, c) 0900 UTC le 25 janvier et d) 1400 UTC le 26 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

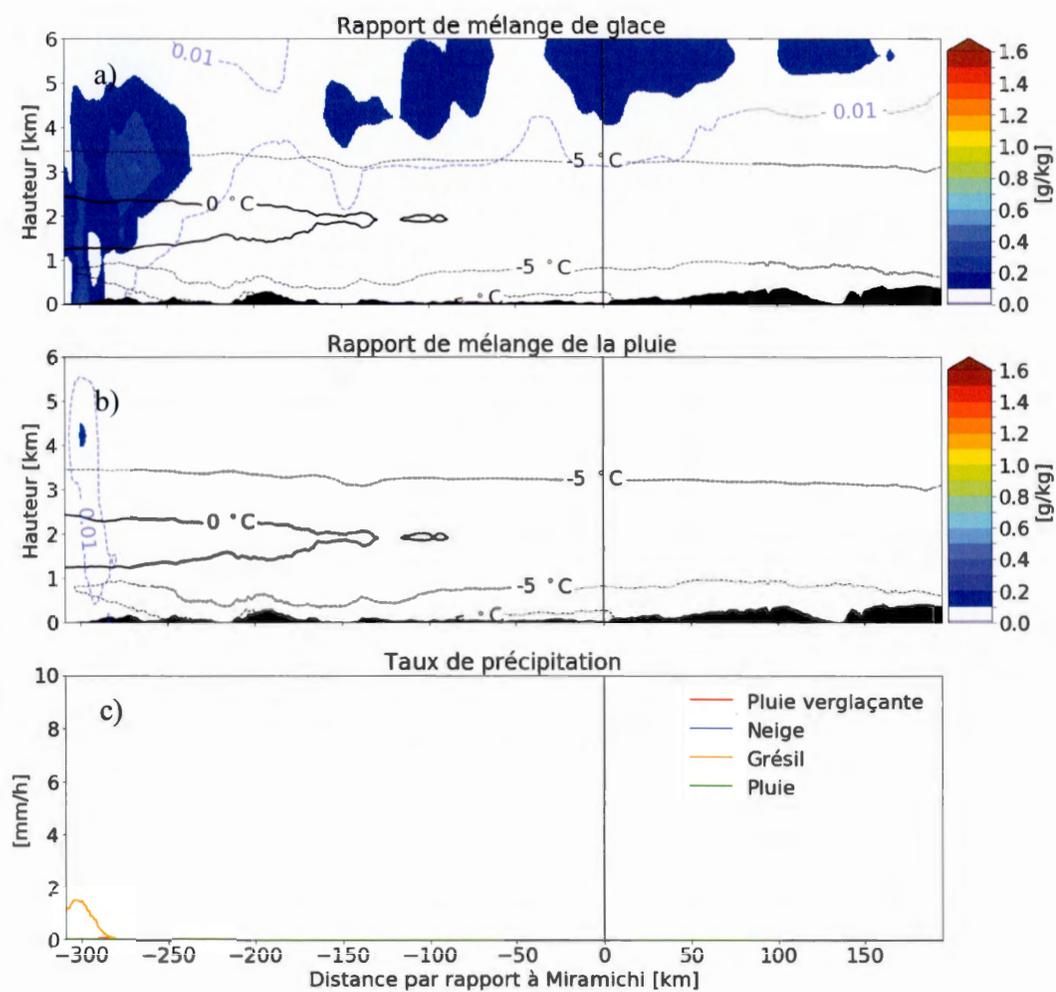


Figure 4.10 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 1300 UTC le 24 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

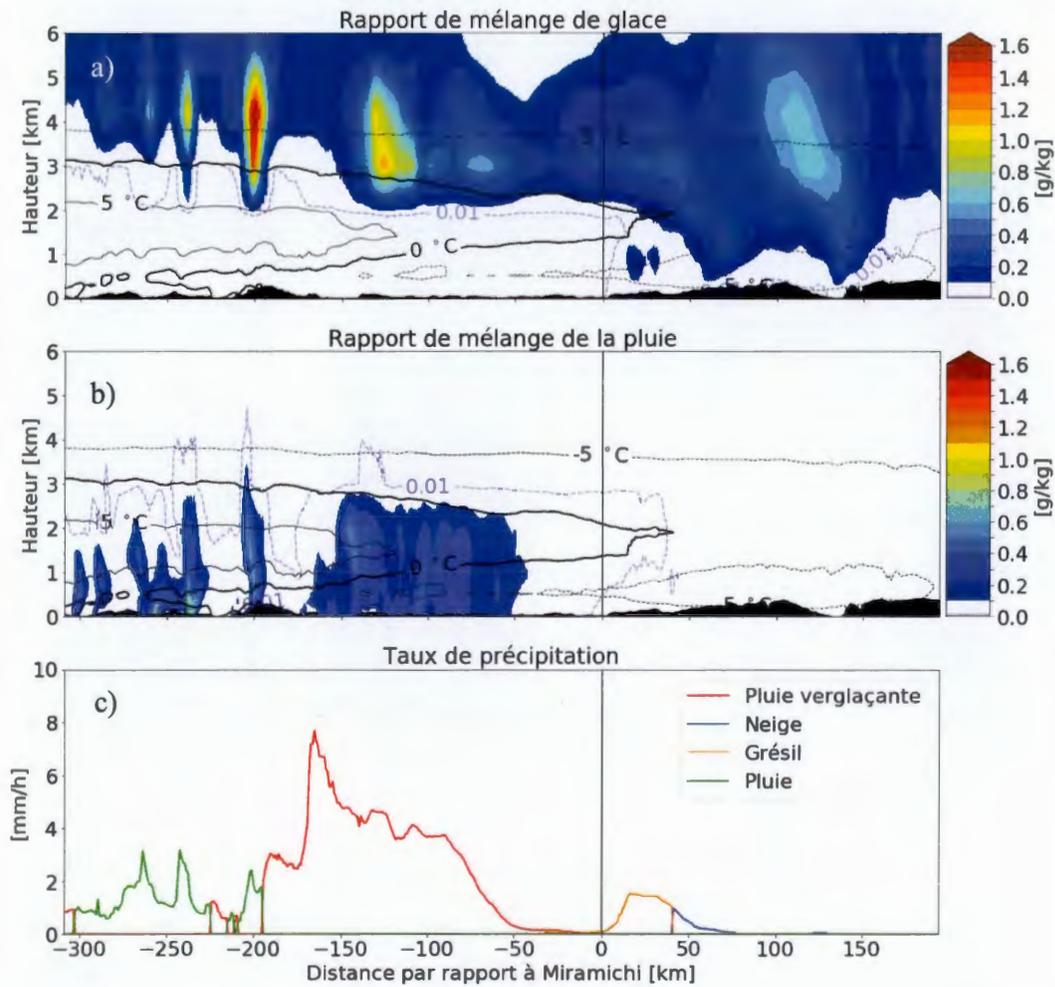


Figure 4.11 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0000 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

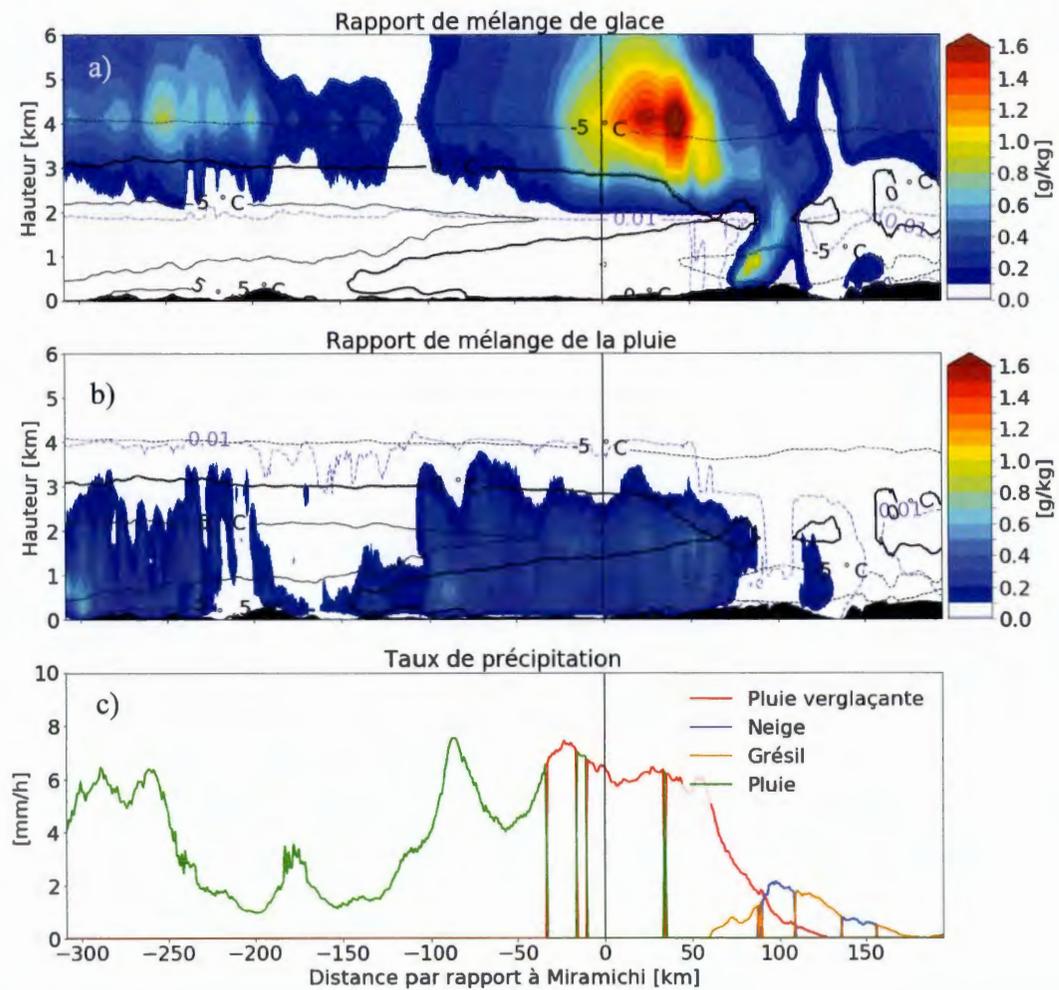


Figure 4.12 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) rapport de mélange de la pluie c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0900 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

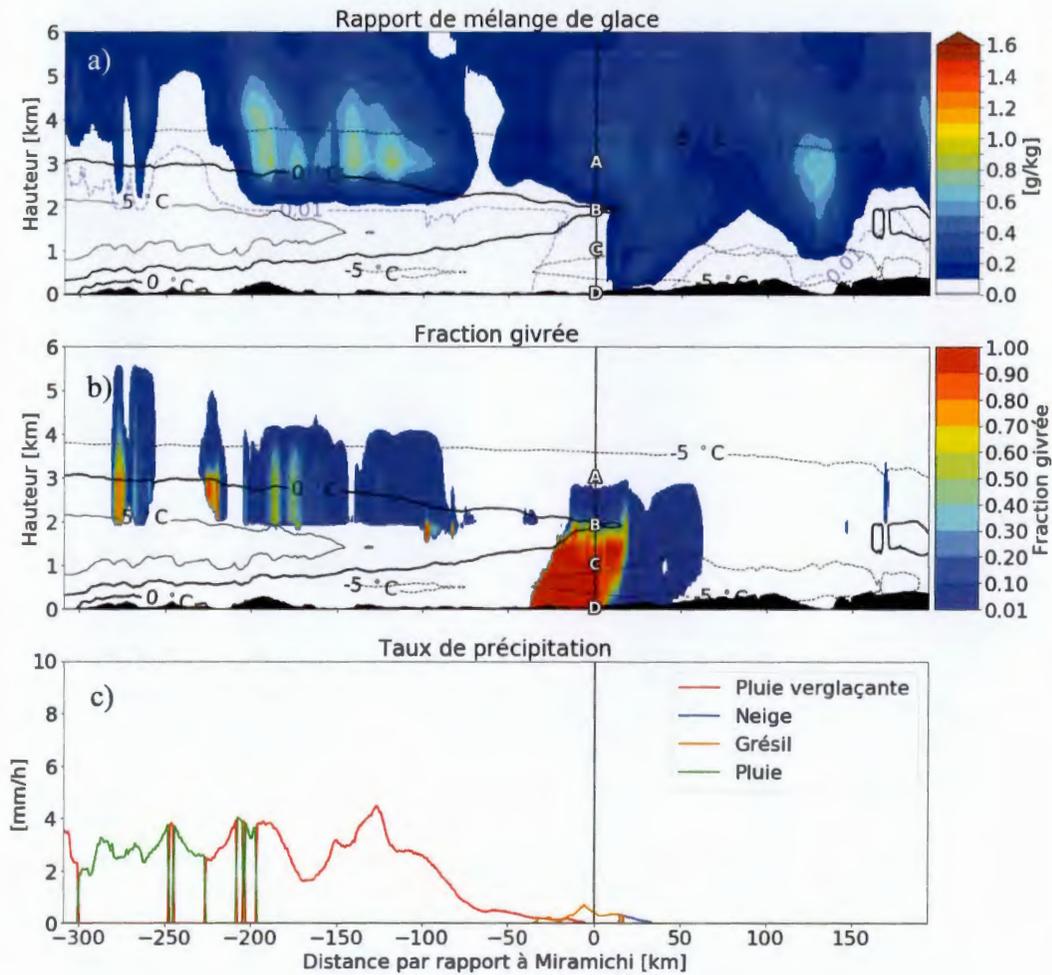


Figure 4.13 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) de la fraction de givrage c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 2300 UTC le 24 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

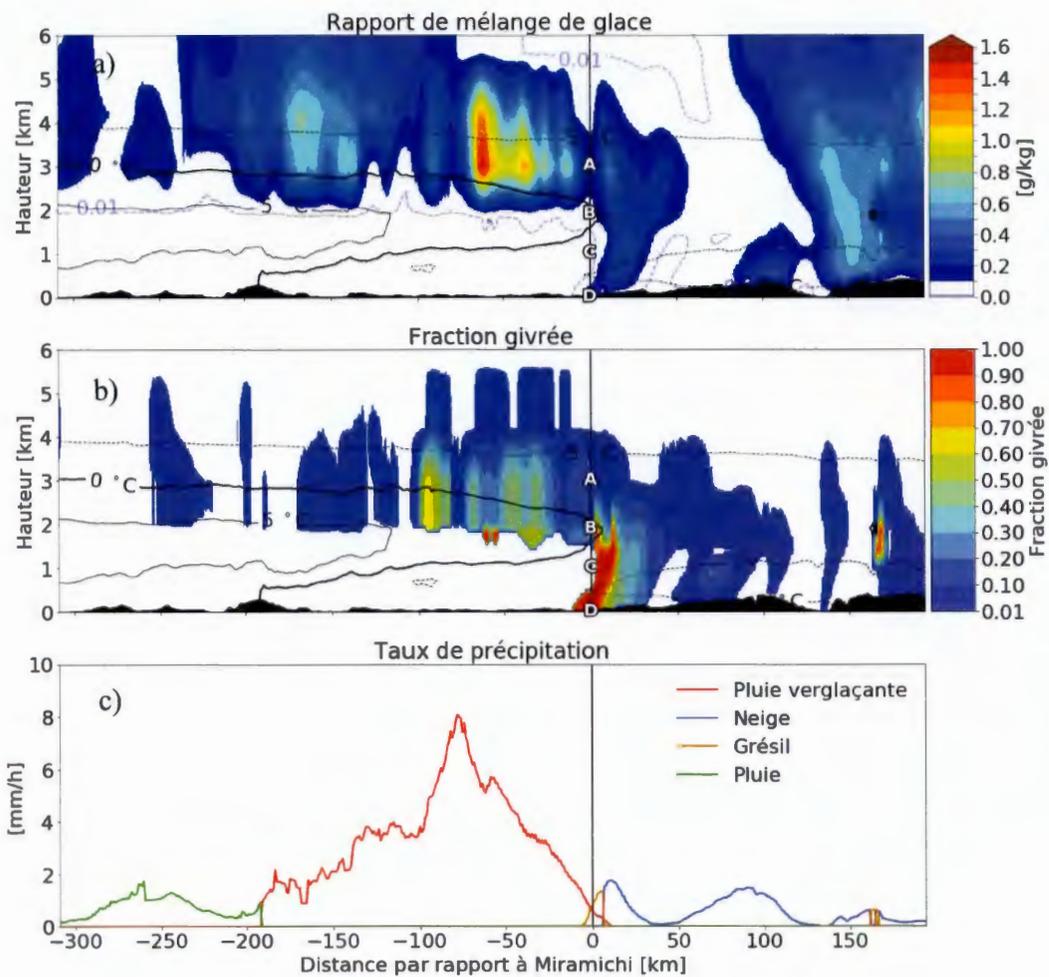


Figure 4.14 Coupe verticale du a) rapport de mélange total des particules glacées b) de la fraction de givrage c) taux de précipitation simulé par le modèle GEM4 à 0200 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

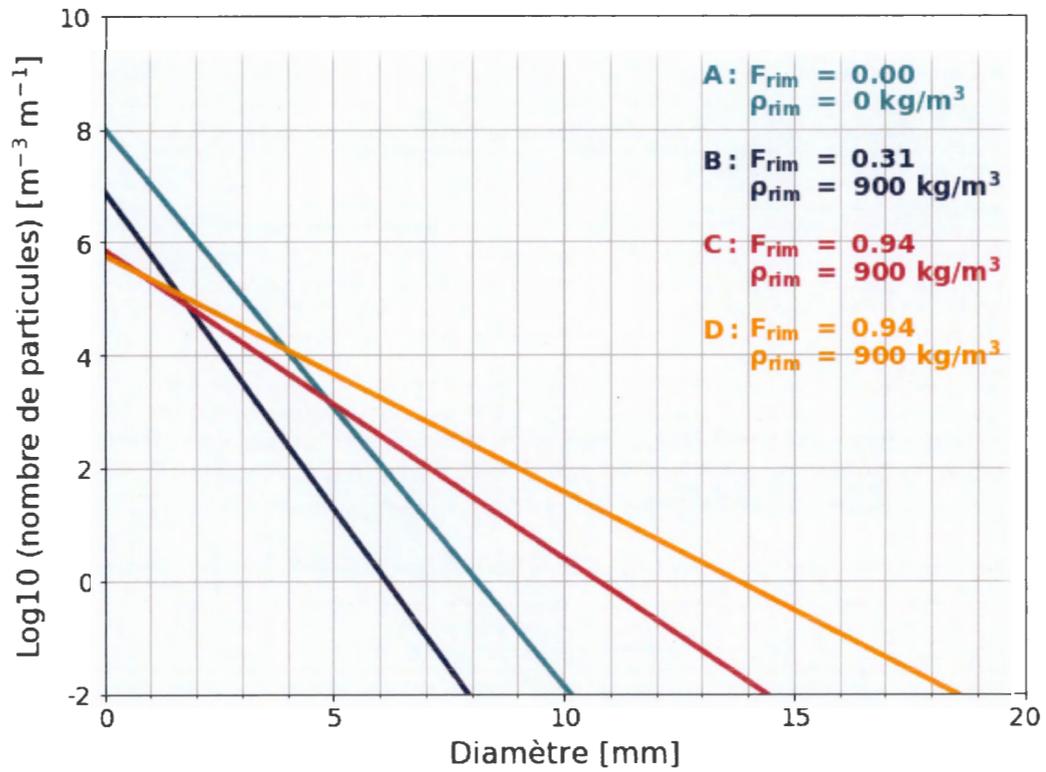


Figure 4.15 Distribution de taille des particules glacées à 2300 UTC le 24 janvier.

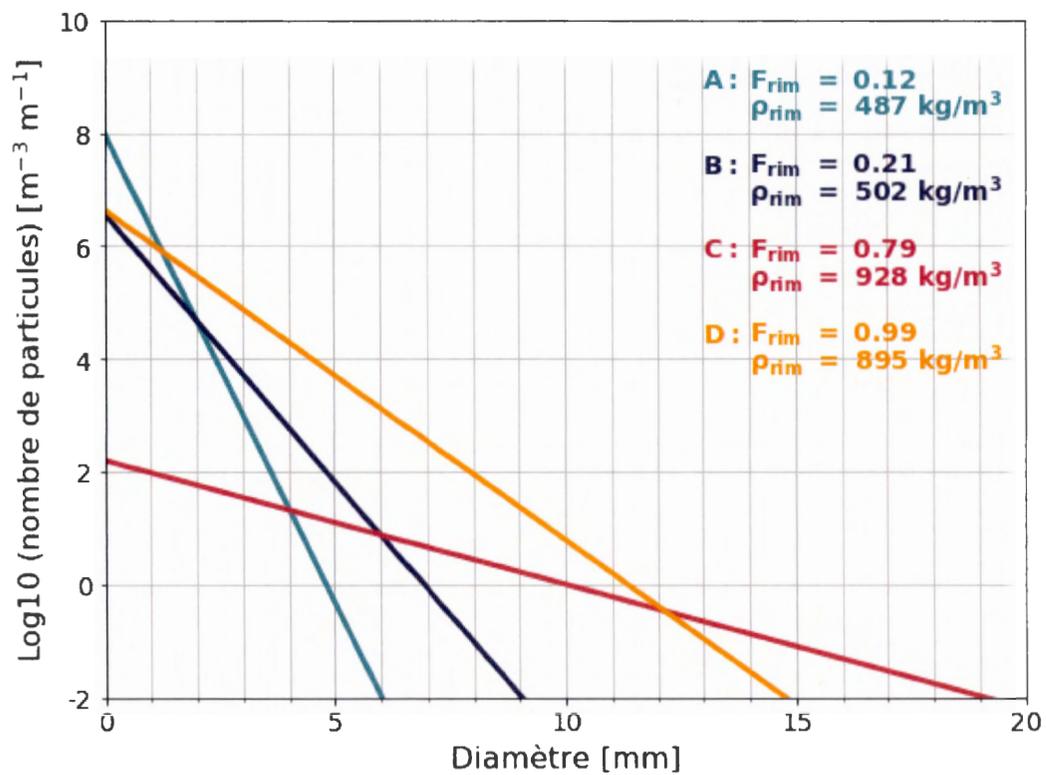


Figure 4.16 Distribution de taille des particules glacées à 0200 UTC le 25 janvier.

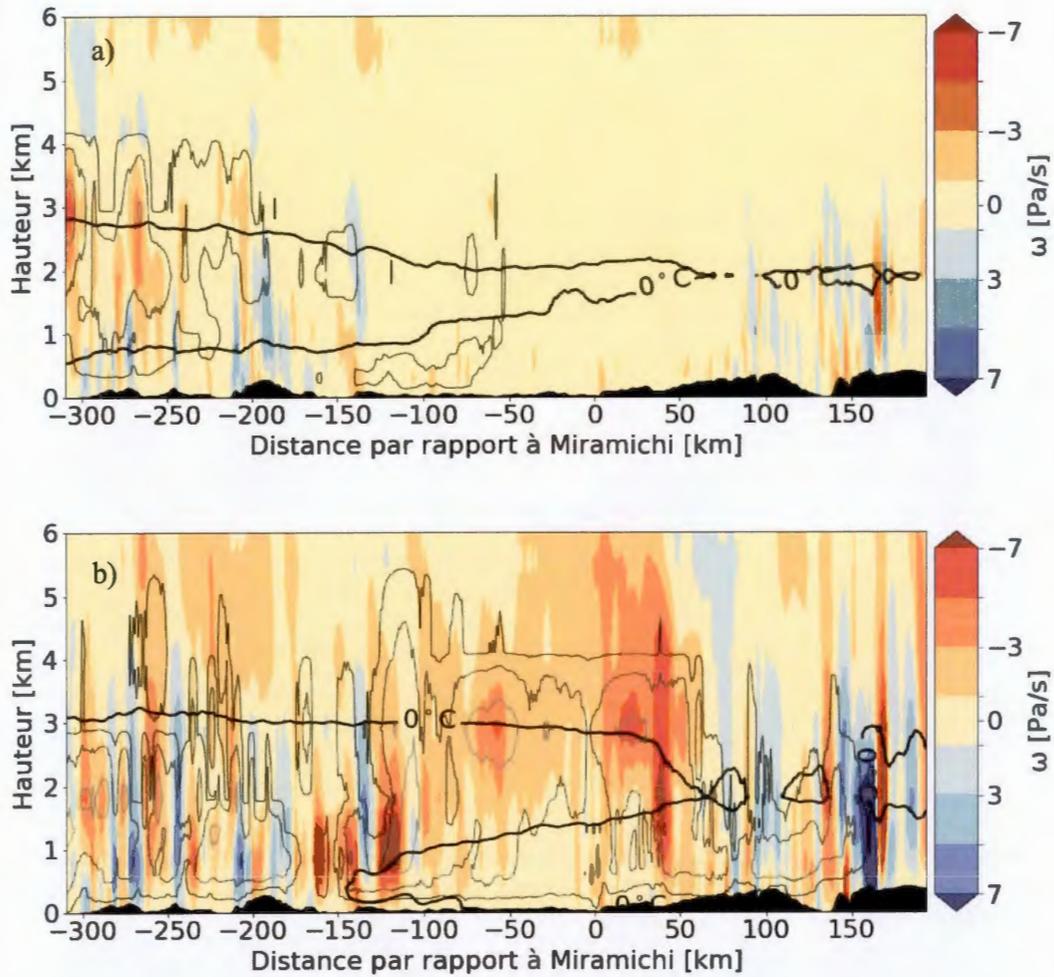


Figure 4.17 Coupe verticale de la quantité de mouvement vertical et du rapport de mélange des nuages simulés par le modèle GEM4 à a) 2000 UTC le 24 janvier et à b) 0900 UTC le 25 janvier. La coupe va du sud-est (côté gauche) au nord-ouest (côté droit).

CHAPITRE V

IMPACT DE L'ACCRÉTION DE GLACE SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

5.1 Répartition et durée des coupures de courant

Parmi les facteurs ayant influencé la gravité de la tempête, deux éléments ressortent des rapports d'Énergie NB Power (2017) et du Wagner et NB (2017), soit l'accumulation de glace sur les infrastructures et l'intensité des vents. Ces facteurs aggravants sont étudiés plus en profondeur dans ce chapitre.

Dans leurs rapports d'événement de la tempête, Wagner et NB (2017) et Énergie NB Power (2017) constatent que les régions les plus touchées par les pannes de courant se trouvent le long de la côte est du NB. La figure 5.1 montre la répartition ainsi que la durée des coupures de courant, en jours, causées par l'événement pour toute la province. Il est possible de voir que l'emplacement des villes les plus affectées corrobore avec les constatations, la durée des pannes de courant étant plus importante le long de la côte est du NB et augmentant du sud-est au nord-est jusqu'à la Péninsule acadienne. La ville de Miramichi (fig. 5.2) a connu une panne de courant de presque 10 jours. Les localités entourant la baie de Miramichi ont également été plus affectées que celles plus à l'ouest du territoire de la municipalité. De fortes chutes de neige de même que l'accumulation de glace sur les arbres et les infrastructures auraient été responsables des pertes de courant dans ce secteur (Énergie NB Power 2017). Le comté du Kent, également durement touché, aurait subi beaucoup de dégâts dus aux arbres glacés qui rentraient en contact avec le réseau électrique.

Les pannes de courant les plus longues ont cependant affecté la Péninsule acadienne où presque la totalité des municipalités, de Tracadie jusqu'à Miscou, a été sans électricité pendant 5 jours et plus (fig. 5.3). Le délai le plus long a été enregistré à Miscou, dans la pointe de la Péninsule acadienne, avec presque 18 jours sans courant. Cette valeur extrême et unique peut s'expliquer, en plus de la quantité de verglas (plus de 100 mm rapportés) et les forts vents (11 m s^{-1} rapporté avant le bris de l'instrument) par l'emplacement éloigné de cette localité. Dans son rapport sur les leçons tirées de la tempête, Énergie NB Power (2017) mentionne que les derniers clients auraient été rebranchés le 5 février 2017, menant à moins de 12 jours les pertes de courant les plus longues dans la Péninsule acadienne. La grande accumulation de glace sur les arbres et infrastructures, les conditions météorologiques extrêmes persistantes dans le nord-est de la province et les routes bloquées ont apporté des conditions de travail difficiles aux équipes d'Énergie NB Power et ont ralenti les opérations de rebranchement.

5.2 Approximation de la quantité d'accrétion de glace sur les fils électriques

Une approximation de l'accumulation de glace a été réalisée grâce à deux modèles d'accrétion de glace décrits dans le chapitre II. La figure 5.4 montre les résultats pour a) le modèle de Chaîné et b) celui de Jones pour le NB. La distribution de l'accrétion de glace rappelle celle de la pluie verglaçante (figure 3.9) ce qui n'est pas étonnant considérant que le taux de précipitation est une des variables déterminantes dans les modèles d'accrétion. Pour les deux modèles, le maximum d'accrétion de glace se trouve le long de la côte est du NB, particulièrement dans la Péninsule acadienne. Le modèle de Chaîné semble cependant prédire davantage d'accrétions de glace que celui de Jones. Ceci n'est pas étonnant puisque Jones (1998), en comparant son modèle à celui de Chaîné, entre autres, a constaté que ce dernier prédisait davantage

de glace accrétée et semblait avoir une plus forte dépendance au diamètre du conducteur.

En analysant de plus près la situation à Miramichi (fig. 5.5), on remarque qu'un maximum local important d'accrétion de glace a eu lieu dans la vallée pour les deux modèles. Le patron de pluie verglaçante (fig. 3.9) semble corroborer en partie avec la distribution d'accrétion de glace, mais d'autres facteurs pourraient être en cause. Le modèle de Chaîné prédit jusqu'à 60 mm d'accumulation de glace sur les rives de la rivière Miramichi alors que le modèle de Jones en prédit jusqu'à 55 mm. Ces deux valeurs sont près de celle observée de plus de 50 mm d'accumulation de glace sur le réseau électrique (Énergie NB Power 2017). Des quantités légèrement plus importantes d'accumulation de glace sont également visibles autour de la baie de Miramichi. La distribution d'accrétion de glace semble donc rejoindre la répartition des pannes de courant les plus sévères (fig. 5.2).

Pour ce qui est de la situation dans la Péninsule acadienne, la figure 5.6 montre la même zone que celle de la figure 5.3. Les quantités les plus importantes d'accrétions de glace ont été prédites dans cette région autant avec le modèle de Chaîné qu'avec celui de Jones. Tout comme sur la figure 3.9 de l'accumulation totale de pluie verglaçante, il y a plus d'accumulation de glace le long de la côte faisant face au golfe du Saint-Laurent, de même que le long de la baie des Chaleurs entre Miscou et Grande-Anse. La carte de la durée des coupures de courant (fig. 5.3) montre également que ces régions ont été les plus durement touchées. Le modèle de Jones produit presque autant de glace que celui de Chaîné le long de la côte entre Tracadie et Miscou mais semble prédire des quantités plus faibles dans l'intérieur des terres et à Bas-Caraquet. Malheureusement, peu de données sur les accumulations de glace sont disponibles dans la Péninsule acadienne. Des valeurs d'accrétion de glace allant jusqu'à 100 mm ont toutefois été rapportées pour ce secteur (Wagner et NB 2017).

Dans ce cas, aucun des deux modèles n'a été en mesure de reproduire le maximum de 100 mm de glace accumulée. Il faut cependant se rappeler que les modèles supposent des accrétions de glace uniformes sur des fils cylindriques et que le diamètre a été fixé à 25 mm. Les modèles ont prédit des accumulations de glace atteignant 70 mm. Seulement les précipitations liquides en surfusion ont été utilisées, il faudrait peut-être aussi tenir compte des gouttelettes de nuages et/ou de la bruine verglaçante près de la surface.

5.3 Direction et intensité du vent

D'autres facteurs jouant un rôle crucial dans les coupures de courant liées à l'accumulation de glace sont l'intensité des vents et sa direction par rapport à la surface d'accrétion (Makkonen et al. 2014, Makkonen 1998 ; Jones 1998 ; Yip 1995). De plus, des vents forts perpendiculaires aux infrastructures et aux arbres augmentent les risques de dégâts et d'effondrement des installations électriques. Les figures 5.7 et 5.8 montrent la direction et l'intensité des vents à 10 m au-dessus de Miramichi et de la Péninsule acadienne respectivement à 12 UTC le 25 janvier. Les lignes magenta et vertes représentent respectivement les lignes de transmission et de distribution du réseau électrique d'Énergie NB Power. De plus, les durées des coupures de courant ont été superposées afin de mieux identifier les zones durement touchées. Durant l'événement verglaçant, les vents sont restés sensiblement de la même direction aux deux endroits et ont varié légèrement en intensité. Les vents à 12 UTC le 25 janvier représentent l'état général durant l'événement.

Pour Miramichi (fig. 5.7), il est intéressant de noter l'orientation des vents en provenance du nord-est, soit dans l'axe de la rivière Miramichi. Des vents plus forts ont également été simulés le long de la rivière en atteignant 47 kmh^{-1} . Comme l'intensité du vent est l'une des variables des modèles d'accrétion, il n'est pas étonnant que cet effet de canalisation le long de la rivière ait amené les modèles

d'accrétion de glace à prédire davantage de glace autour de la rivière. Un effet d'entonnoir dû à la baie de Miramichi peut également avoir contribué aux vents plus forts. En regardant l'orientation des lignes de distribution, on remarque l'influence de la rivière sur le développement du réseau et de la ville perpendiculairement à ses rives. Les vents ont donc, dans l'ensemble, frappé plus ou moins perpendiculairement les lignes électriques, ce qui peut avoir contribué à augmenter la charge et ainsi avoir causé des coupures de courant. Le même phénomène de canalisation dans les rivières orientées perpendiculairement à la côte peut également être la cause des plus longues coupures de courant dans le Kent.

Les conditions locales à l'aéroport de Miramichi durant l'événement ont été tracées sur la figure 5.9. Certaines données d'observations sont également disponibles pour cette station, et il est possible de remarquer que l'évolution du champ de température a été reproduite assez fidèlement. Pour ce qui est des vents, le manque de données dû au gel de l'instrument de mesure ne permet pas de comparer avec la simulation. Cependant, avant le gel, l'intensité des vents semblait bien reproduite mais les vents semblaient plus inclinés vers l'est. Les conditions sont restées relativement stables entre 12 UTC le 24 janvier et 00 UTC le 26 janvier, avec des températures se rapprochant du point de congélation sans les dépasser. Cet état a permis l'accumulation d'une bonne quantité de glace et les modèles de Chaîné et Jones diagnostiquent près de 50 et 40 mm de glace accrétée respectivement.

Dans la Péninsule acadienne (fig. 5.8), le vent simulé provenait également du nord-est. La proximité avec le golfe du Saint-Laurent se fait ressentir puisque les vents sont plus forts sur l'eau que sur la terre. Les vents à 10 m restent forts au-dessus de la pointe de la péninsule, atteignant près de 54 kmh^{-1} . Il est plus difficile de stipuler sur l'impact de la direction du vent sur le réseau électrique pour cette région considérant que les coupures de courant prolongées s'étendent sur toute la zone.

La figure 5.10 montre les conditions locales à Bas-Caraquet lors de l'événement. Les précipitations verglaçantes arrivant plus tard qu'à Miramichi, la station a enregistré les vents jusqu'à bien plus tard dans l'événement. Cette observation semble indiquer que les vents simulés sont légèrement plus forts que ceux observés durant l'événement. La température a également été bien reproduite dans la simulation après 12 UTC le 24 janvier et, encore une fois, les températures se sont rapprochées de 0 °C sans les dépasser. Des données sur la quantité totale de précipitation observées durant l'événement étaient également disponibles pour cette station. La courbe de la précipitation de la simulation, dont le pic d'intensité est un peu hâtif, ressemble à celle observée. Les forts taux de précipitations verglaçantes de même que les températures sous le point de congélation ont permis aux modèles de Chaîné et de Jones de prédire entre 55 et 60 mm d'accumulation de glace pour Bas-Caraquet. Aucune observation directe de précipitation verglaçante n'a été faite à cet endroit, mais 65,1 mm de précipitations totales ont été enregistrées selon ECCC.

5.4 Relation entre les facteurs aggravants et la durée des coupures de courant

Plusieurs facteurs sont en cause dans la gravité de l'événement de janvier 2017 et il peut être difficile de départager leurs importances relatives sur la durée des coupures de courant. La figure 5.11 représente visuellement cette relation en plus d'inclure de l'information sur l'emplacement géographique (couleur des pastilles) et les vents maximums à 10 m (rayon des pastilles). À noter que les deux modèles d'accrétion de glace montraient sensiblement la même information. Le modèle de Jones a donc été choisi pour représenter l'accrétion de glace. Les données de l'île Miscou ont également été omises des graphiques mais seront discutées plus bas.

La première constatation dans les figures 5.11(a à d) est que seulement 5 comtés ont été privés d'électricité pendant 5 jours et plus. Ces figures font ressortir que les comtés longeant le détroit de Northumberland et le golfe du Saint-Laurent ont été les

plus touchés (voir fig. 5.1). Une deuxième constatation est que les comtés ayant accumulé le plus de pluie verglaçante (fig. 5.11a), ceux ayant eu les plus longues durées de pluie verglaçante (fig 5.11b) et par le fait même eu le plus d'accrétions de glace (fig. 5.11c) sont les comtés du Northumberland et du Gloucester. On observe également une plus forte relation entre la vitesse moyenne des vents pour le comté de Gloucester et la durée des coupures de courant. La plupart des forts vents maximums y ont également été simulés. Seuls ces deux comtés ont connu des pannes de plus de 9 jours.

L'impact de la vitesse moyenne du vent et des vents maximums peut également s'observer pour les comtés de Gloucester et du Kent. Dans le cas du comté de Gloucester, plusieurs localités n'ayant perdu de l'électricité que pendant moins de 9 jours n'ont également eu que des vents moyens et maximums plutôt faibles (fig. 5.11d). Moins d'accrétion de glace a donc été simulée, malgré d'importantes accumulations de pluie verglaçante. La charge du vent sur les arbres et fils électriques a sûrement dû être réduite par le fait même. De la même manière, les vents moyens et maximums plus forts sont en lien avec des pannes de courant plus longues pour le comté du Kent.

Une dernière constatation peut également être tirée de l'emplacement géographique des municipalités les plus affectées. Les deux comtés les plus affectés sont ceux les plus au nord-est, alors que les trois autres se trouvent davantage dans le sud-est du NB. Comme mentionné dans son rapport de la tempête de 2017, Énergie NB Power (2017) rapporte que ses équipes d'intervention ont pu agir rapidement dans le sud de la province, non seulement parce que la tempête a affecté ces régions en premier mais également parce que les conditions météorologiques dangereuses n'ont pas persisté aussi longtemps que dans le nord-est. Les deux comtés les plus touchés (Gloucester et Northumberland) ont donc non seulement été longuement affectés par la tempête, mais la plus faible densité de population de même que l'éloignement de la Péninsule

acadienne peuvent avoir contribué à la gravité de l'événement. L'île Miscou en est un cas extrême où les pannes de courant ont duré 18 jours, entre autres dû à sa position géographique. L'accumulation simulée de pluie verglaçante pour l'île est de près de 60 mm, avec des vents moyens à 10 m à 33 km h⁻¹ et des vents maximums à 60 km h⁻¹. En comparant avec les autres points du comté de Gloucester sur la figure 5.11a, l'île Miscou ne se démarque pas par son accumulation simulée de pluie verglaçante, bien qu'elle soit supérieure à la moyenne (47 mm) et la médiane (51 mm) du comté. Également, sur les 68 municipalités dans le comté de Gloucester où les coupures de courant ont duré plus de 5 jours, 36 d'entre elles ont eu des vents supérieurs à 50 km h⁻¹. Le facteur décisif pour la durée des pannes de courant extrême sur l'île Miscou semble donc être les considérations d'ordre logistique.

Plusieurs autres facteurs n'ont pas pu être pris en compte dans cette démarche, notamment la présence d'arbres près des lignes électriques, la présence de bris supplémentaires suite aux réparations ou encore la répartition des pannes entre le réseau de distribution et le réseau de transmission.

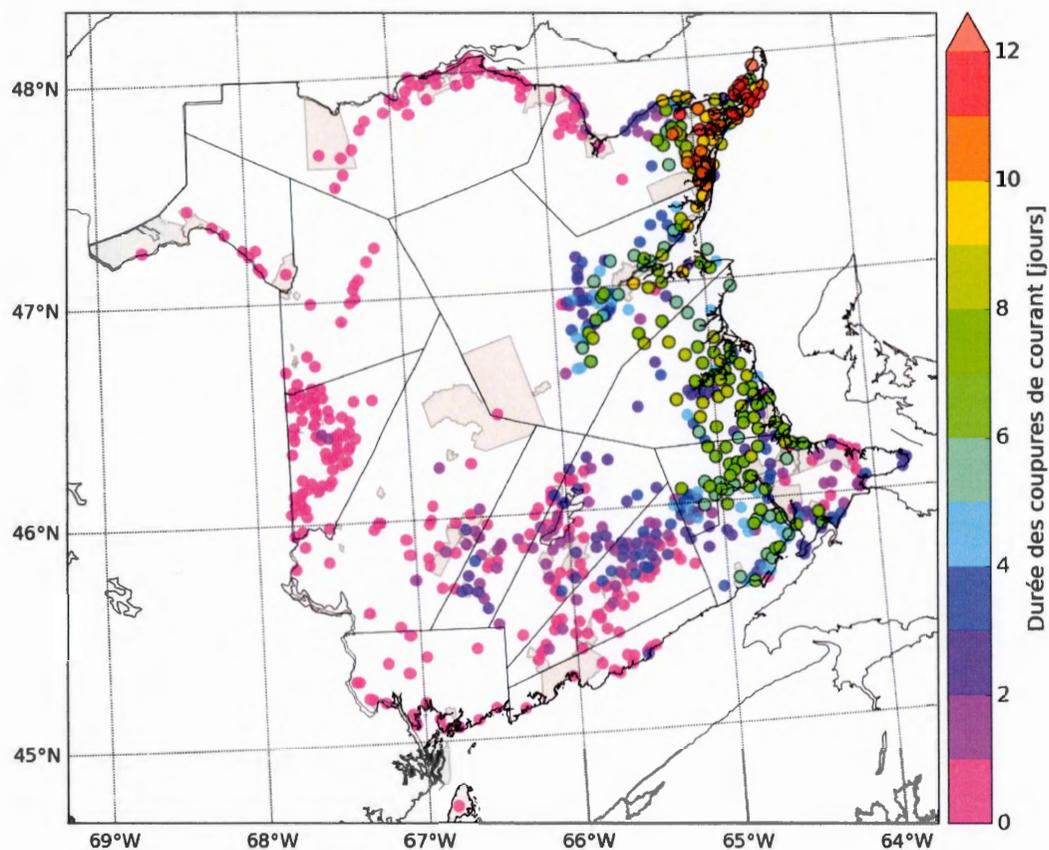


Figure 5.1 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour le NB. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

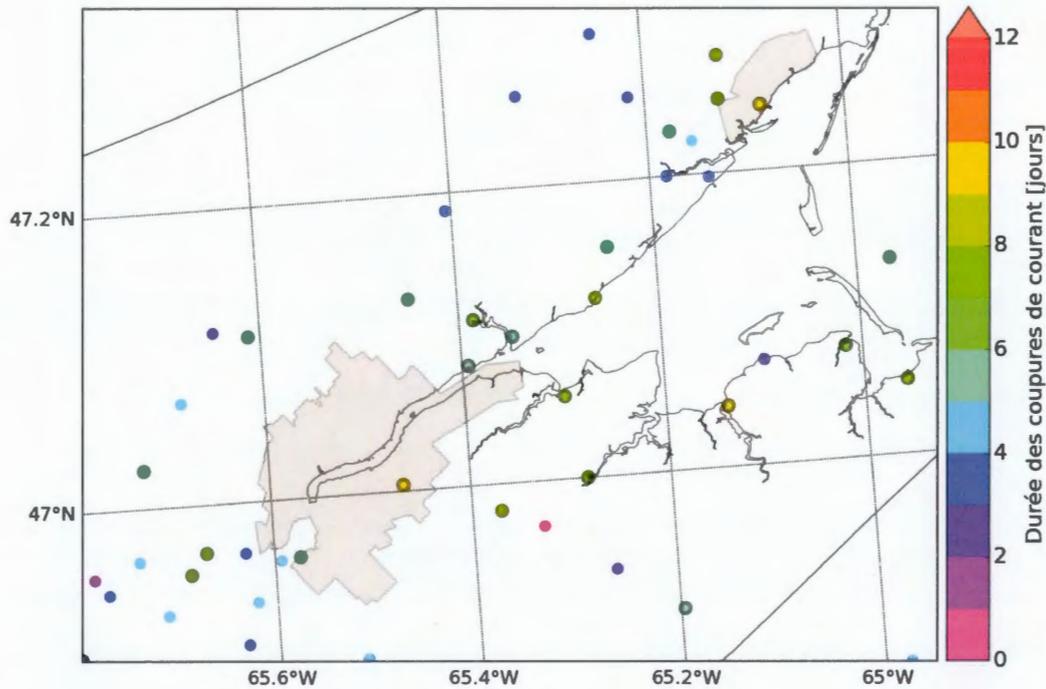


Figure 5.2 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour Miramichi. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005 : NB 2019) et RNCAN (2017-).

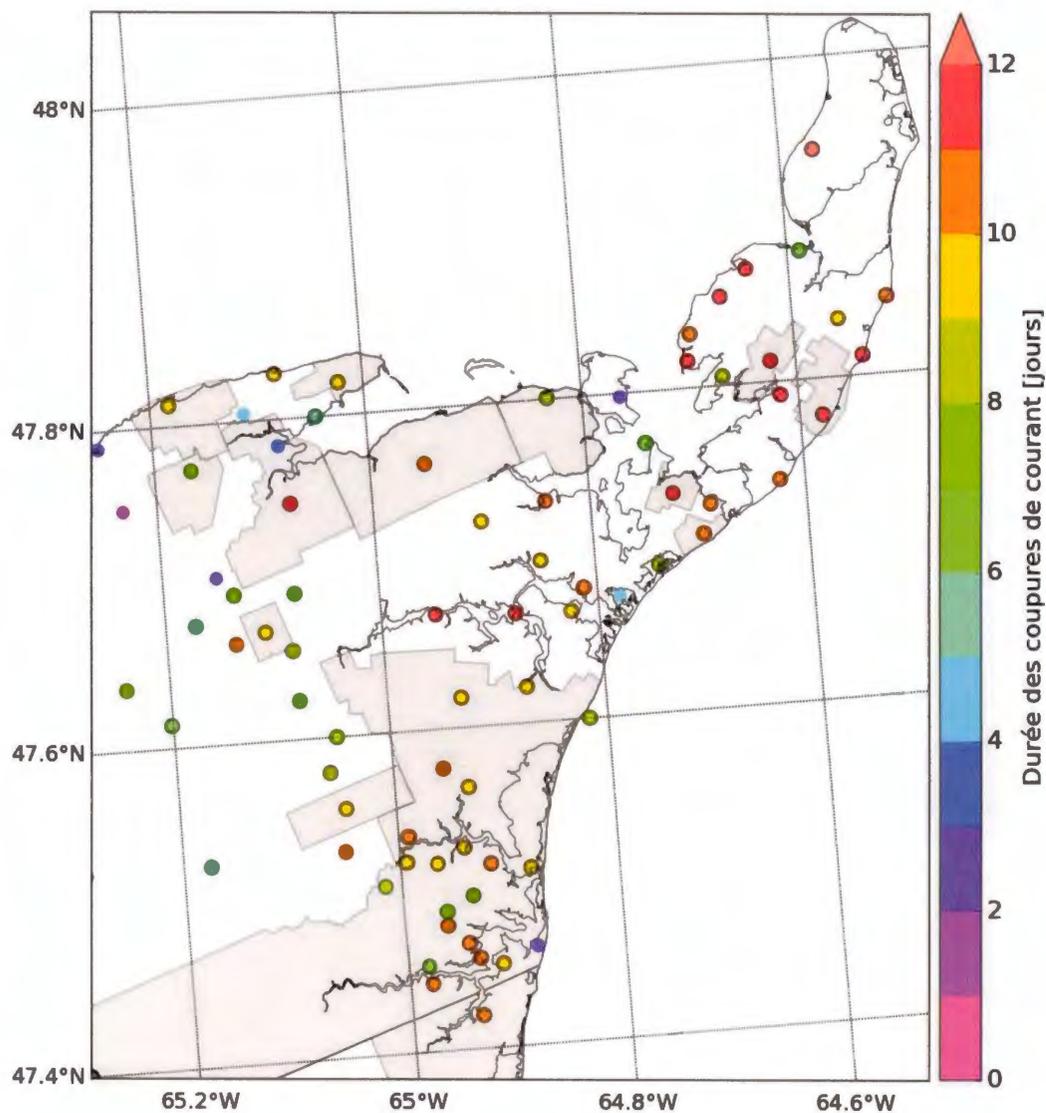


Figure 5.3 Carte de la durée des coupures de courant (jours) causées par la tempête de janvier 2017 pour la Péninsule acadienne. Les zones ombragées sont les délimitations des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005 : NB 2019) et RNCAN (2017-).

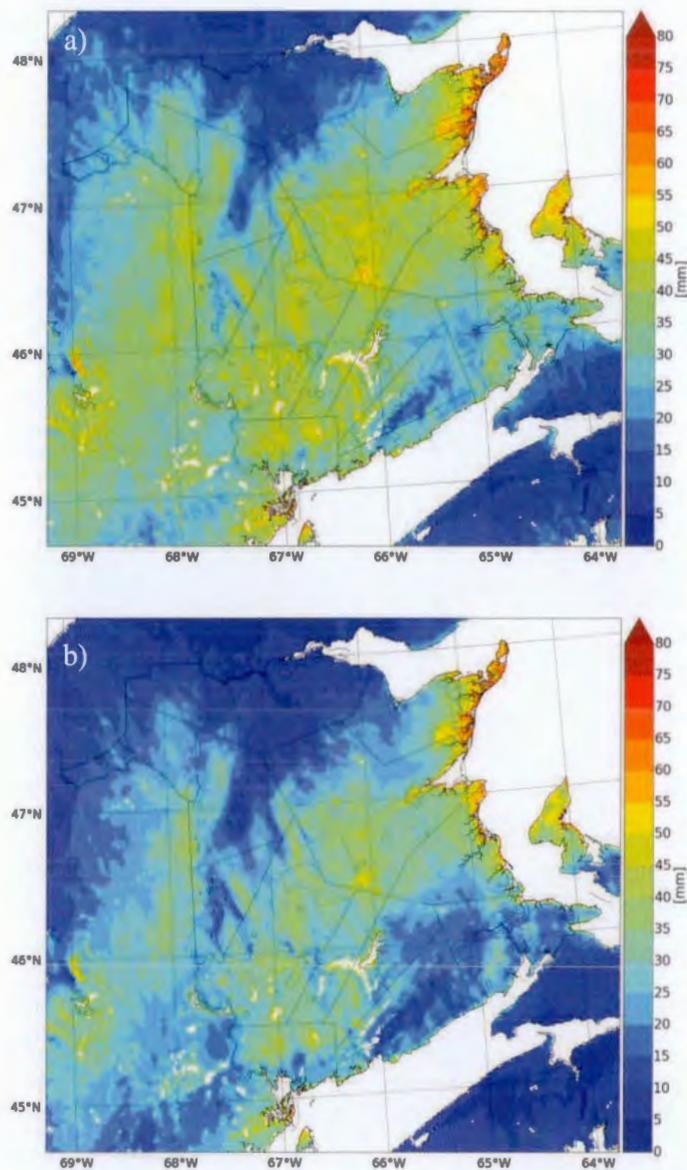


Figure 5.4 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour le NB selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

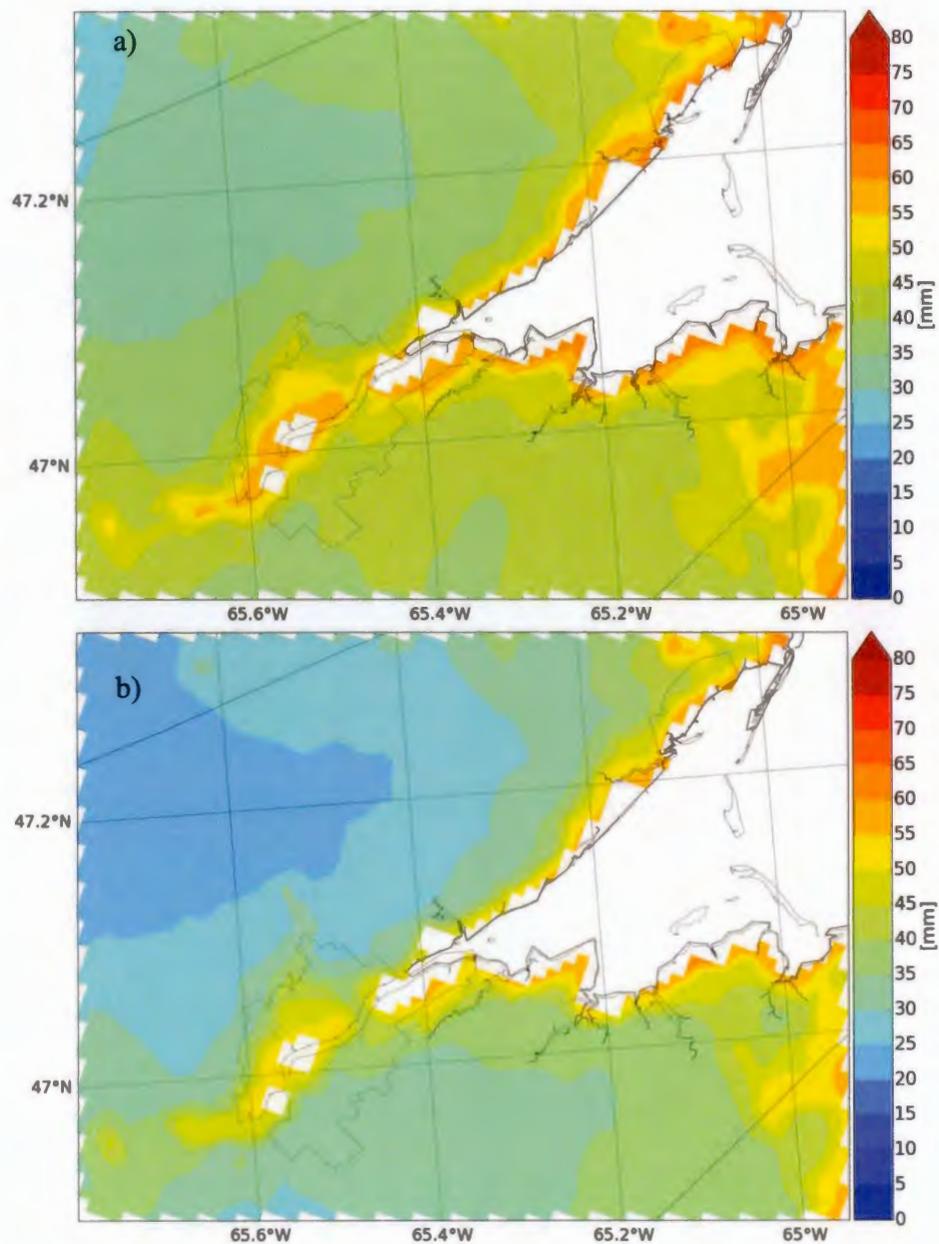


Figure 5.5 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour Miramichi selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

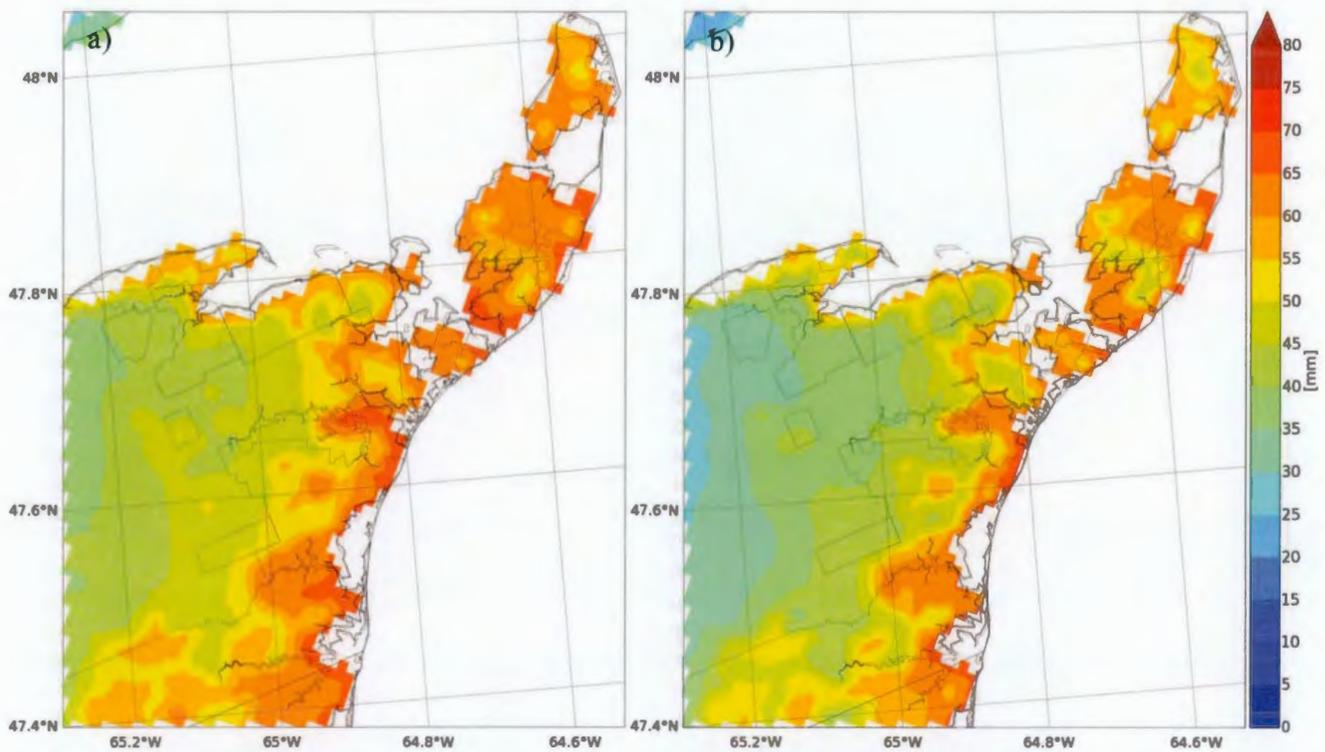


Figure 5.6 Carte de l'épaisseur radiale équivalente de glace estimée sur une ligne électrique de diamètre de 25 mm pour la Péninsule acadienne selon les modèles d'accrétion de a) Chaîné et b) Jones. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

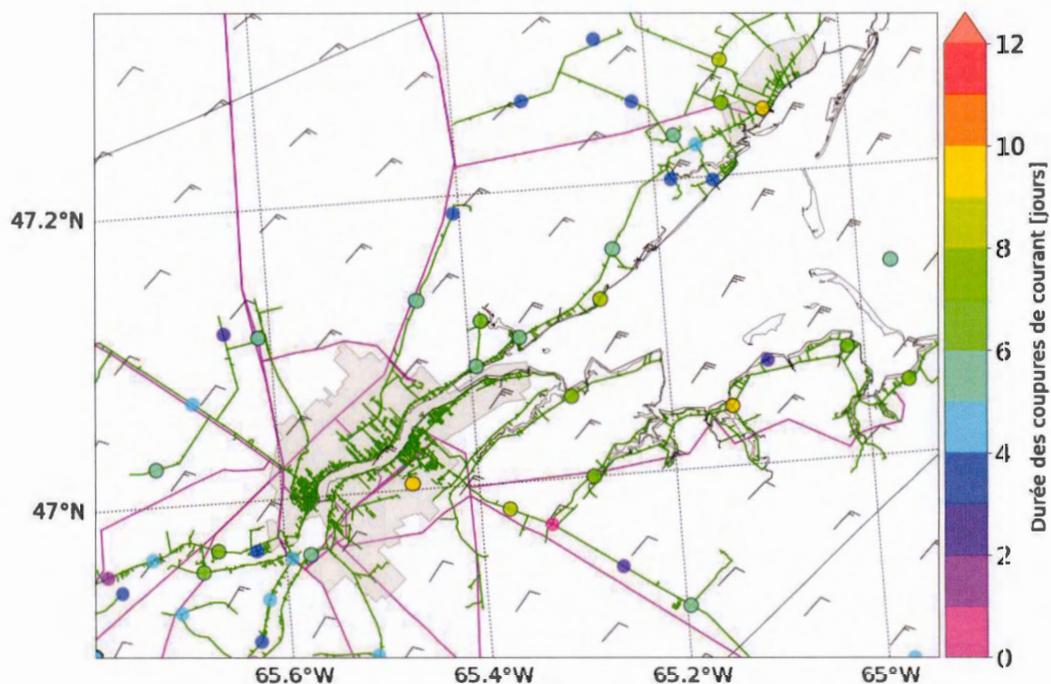


Figure 5.7 Carte montrant la direction des vents de surface sur Miramichi à 1200 UTC le 25 janvier et l'orientation du réseau électrique. Les lignes magenta représentent les lignes de transmission et les lignes vertes les lignes de distribution. Les cercles représentent la durée des coupures de courant des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

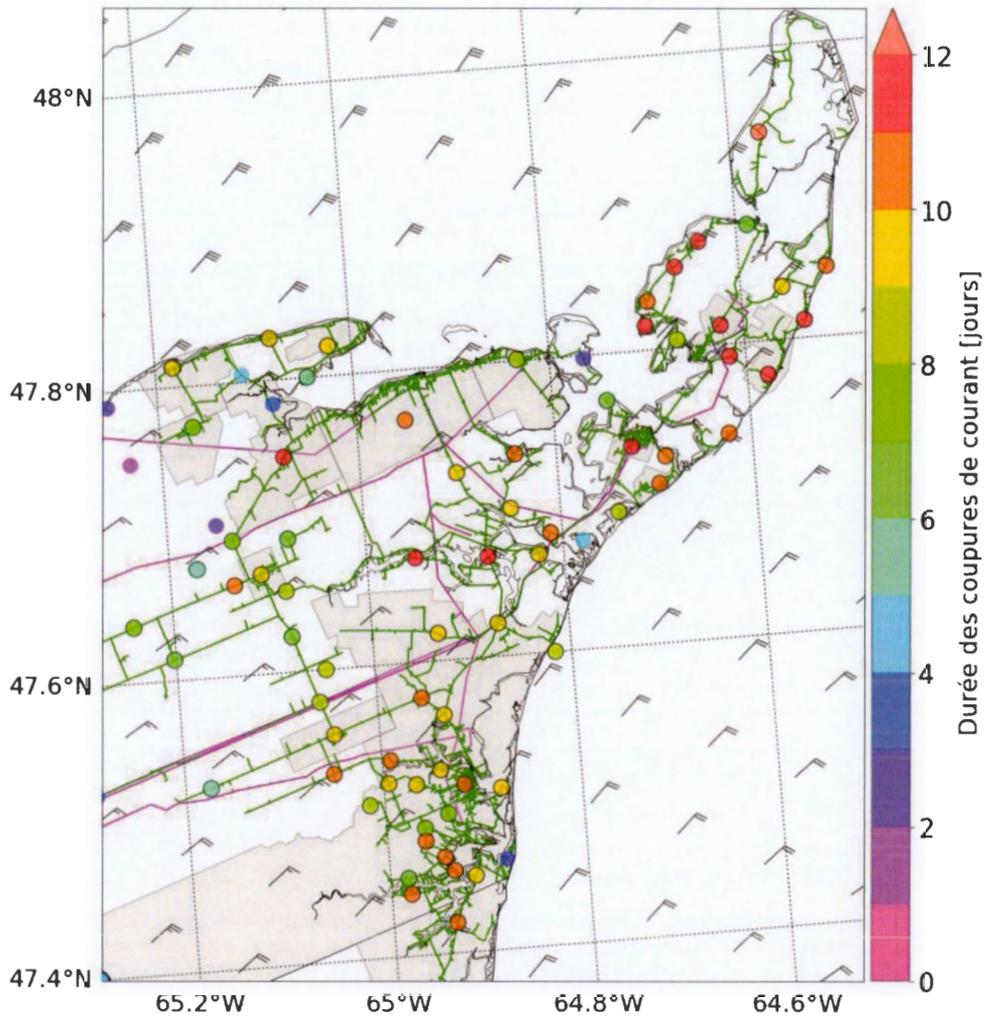


Figure 5.8 Carte montrant la direction des vents de surface sur la Péninsule acadienne à 1200 UTC le 25 janvier et l'orientation du réseau électrique. Les lignes magenta représentent les lignes de transmission et les lignes vertes les lignes de distribution. Les cercles représentent la durée des coupures de courant des municipalités. Les municipalités ayant eu des coupures d'une durée de 5 jours ou plus sont rehaussées d'un contour noir. Contient de l'information visée par la licence de données ouvertes de GeoNB (NB 2005; NB 2019) et RNCAN (2017-).

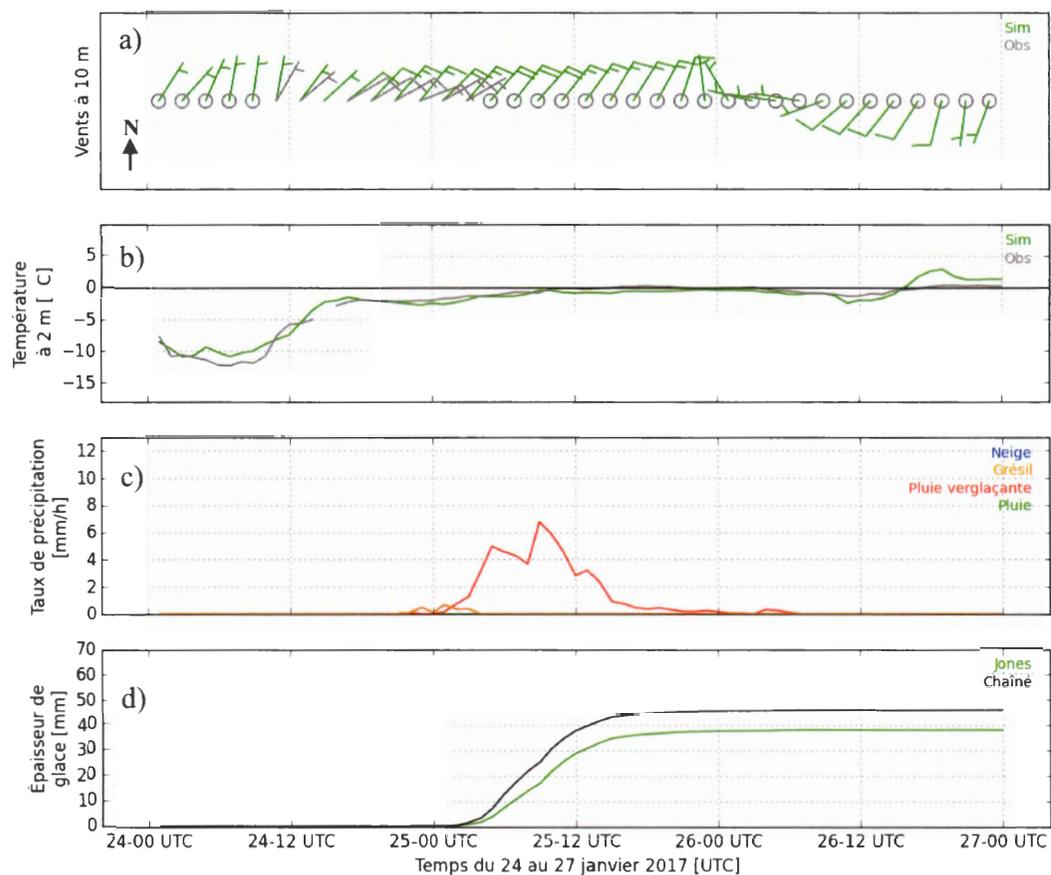


Figure 5.9 Série temporelle des conditions locales à Miramichi entre le 1200 UTC le 24 janvier et le 0000 UTC le 27 janvier a) des vents horizontaux à 10 m, b) de la température à 2 m, c) du taux de précipitation simulés par le modèle GEM4 et de d) l'accrétion de glace produite par les modèles de Chaîné et Jones. Les observations horaires proviennent des METAR obtenus via les sites web de ECCC et de UW.

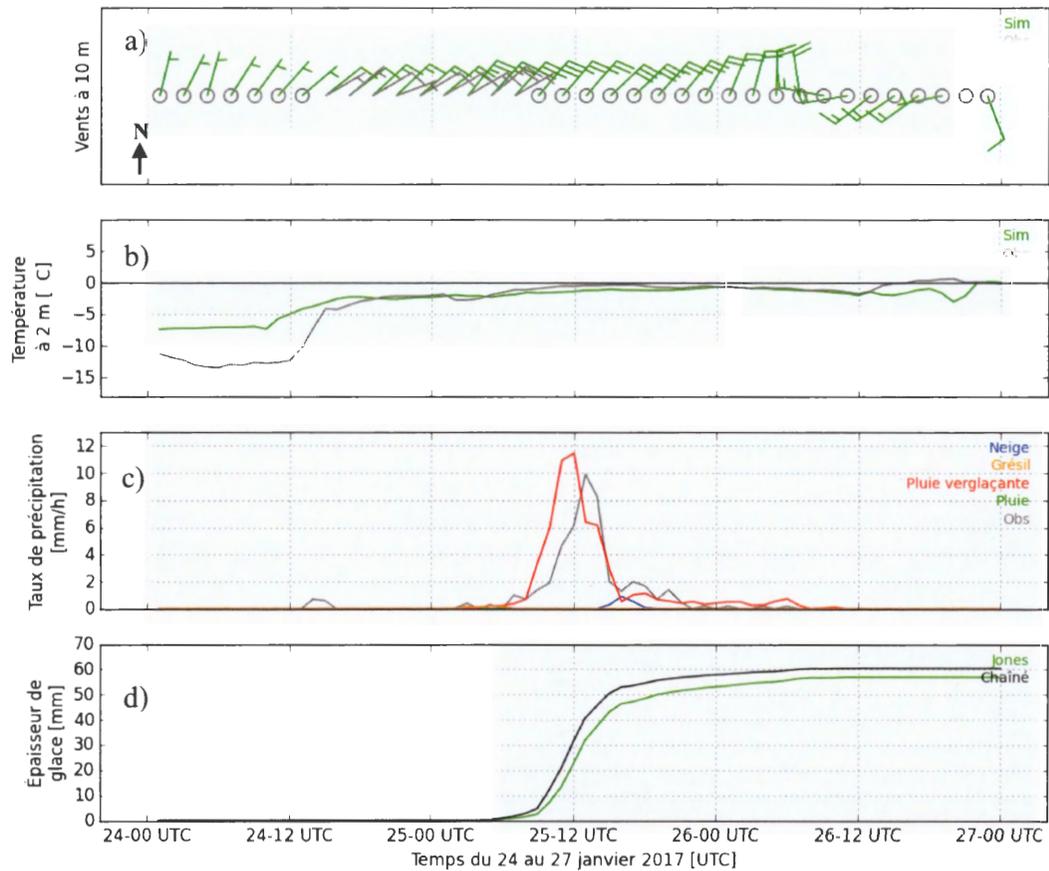


Figure 5.10 Série temporelle des conditions locales à Bas-Caraquet entre le 1200 UTC le 24 janvier et le 0000 UTC le 27 janvier a) des vents horizontaux à 10 m, b) de la température à 2 m, c) du taux de précipitation simulés par le modèle GEM4 et de d) l'accrétion de glace produite par les modèles de Chainé et Jones. Les observations horaires proviennent des METAR obtenus via les sites web de ECCC et de UW.

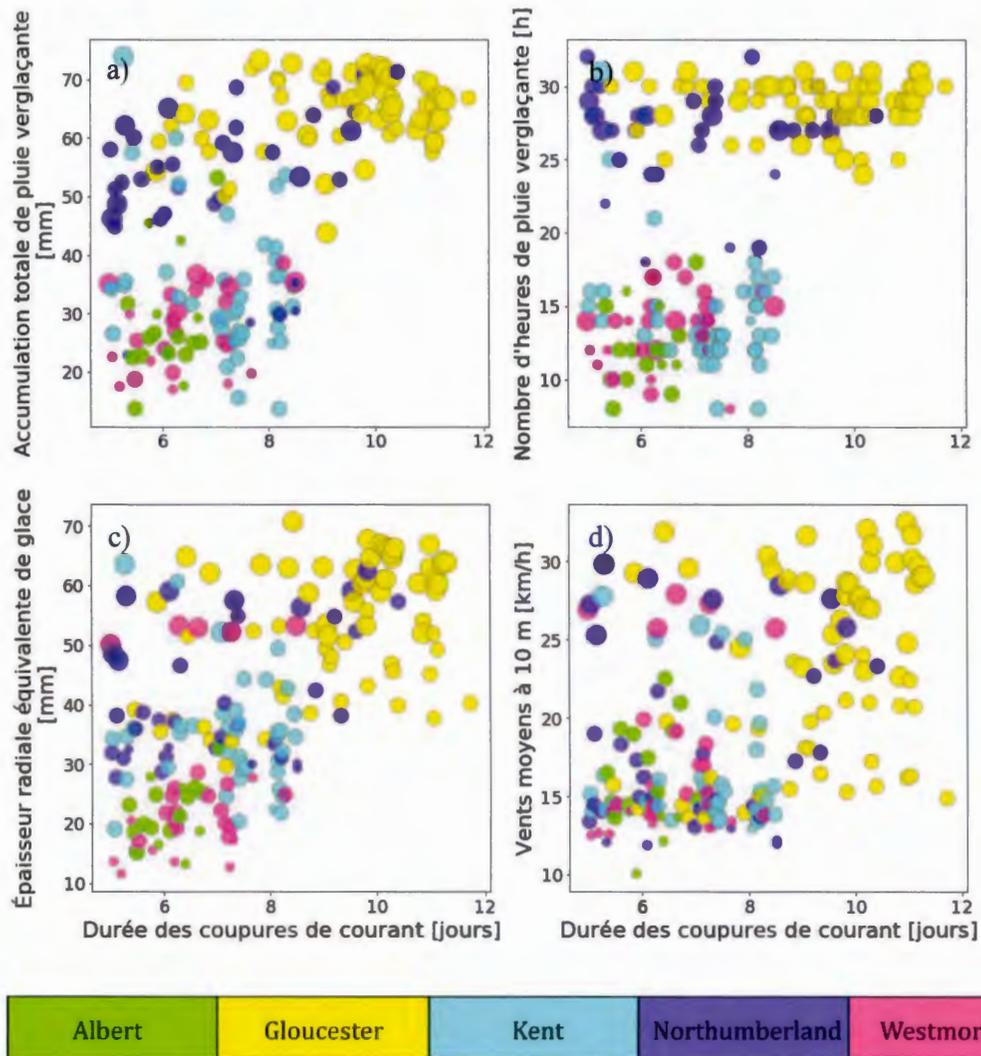
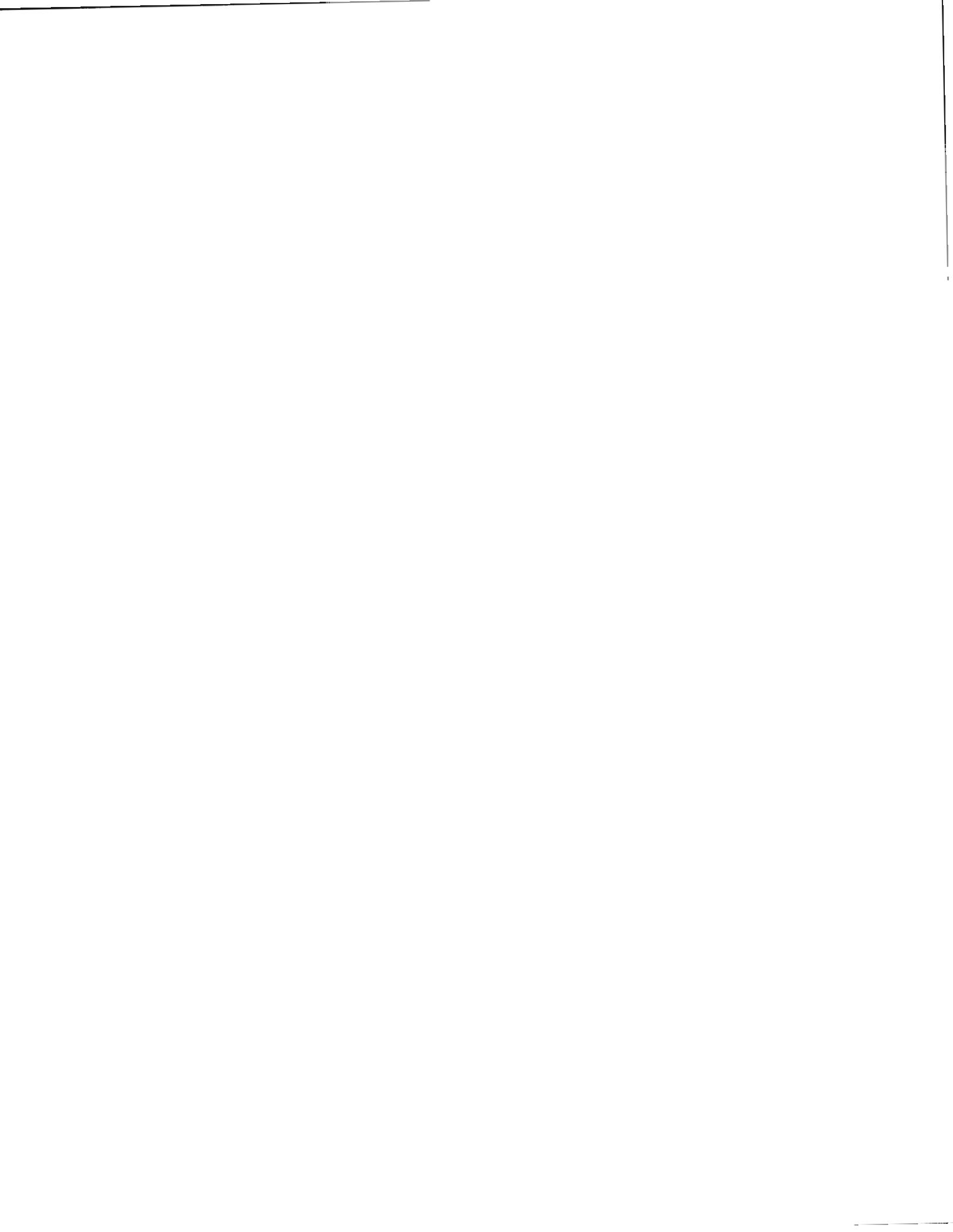


Figure 5.11 Relation entre la durée des coupures de courant de 5 jours et plus et a) l'accumulation totale de pluie verglaçante; b) le nombre d'heures de pluie verglaçante; c) l'épaisseur radiale équivalente de glace du modèle d'accrétion de Jones et d) les vents moyens à 10 m. Les couleurs représentent le comté affecté par la coupure de courant. Le rayon des cercles représente le vent maximum en km h^{-1} .



CHAPITRE VI

DISCUSSION ET CONCLUSION

6.1 Discussion

La tempête hivernale du 24 au 27 janvier 2017 a été l'une des plus marquantes pour le NB. La très grande accumulation de pluie verglaçante sur les surfaces, de 50 mm à Miramichi à plus de 100 mm rapportés dans la Péninsule acadienne, a occasionné des pannes de courant sur l'ensemble de la province. De nombreux foyers ont été privés d'électricité pendant plusieurs jours, en plein hiver. Cette étude voulait faire ressortir les facteurs qui ont mené à la gravité de l'événement.

Pour ce faire, une étude des conditions synoptiques lors de l'événement a été réalisée grâce à des données d'ECCC, de la NOAA et de la UW. Deux principaux facteurs synoptiques en sont ressortis. Premièrement, le système météorologique se déplaçait lentement. Le centre dépressionnaire était très relâché en surface et les contours étaient fermés jusqu'à 500 hPa. Bien que la dépression était occluse, on voyait apparaître des dépressions secondaires avec la zone frontale. Ce déplacement lent a favorisé la persistance des conditions idéales pour les précipitations verglaçantes. L'intrusion d'air chaud au-dessus du NB est restée en place pendant plus d'une journée, ce qui a permis d'enregistrer 31 h de pluie verglaçante à Miramichi. Deuxièmement, l'axe du creux en altitude était incliné négativement, ce qui, tel que mentionné dans le chapitre III, a favorisé l'advection d'air chaud à l'avant du système. Les eaux relativement chaudes de l'océan Atlantique et le faible couvert de

glace sur le golfe du Saint-Laurent ont permis un apport en énergie et en humidité au système météorologique. Combiné à l'instabilité barocline associée à cette inclinaison du creux en altitude, le système a pu produire des quantités importantes de précipitations, accumulant plus de 100 mm par endroit au NB et en NS.

Puisque certaines observations n'étaient pas disponibles dû à l'étendue du territoire et au non-fonctionnement d'instruments durant l'événement, une simulation numérique à haute résolution a été réalisée afin d'analyser les facteurs aggravants aux échelles méso et microphysique. Le modèle GEM4 couplé atmosphère-océan a été utilisé avec le schéma microphysique P3 (Morrison et Milbrandt 2015) afin de tourner une simulation entre le 24 et le 27 janvier 2017 à une largeur de point de grille de 1 km et des sorties de modèle de 1 h.

Après avoir comparé les champs synoptiques aux observations, la simulation a permis d'analyser les distributions horizontale et verticale des différents types de précipitations. Un maximum de pluie verglaçante a été perçu le long de la côte est du NB. Les épaisseurs partielles ont montré que les précipitations au plus fort de la tempête étaient sous forme de pluie verglaçante avec une bande de grésil à l'avant. Des mélanges entre de la pluie verglaçante, du grésil et de la neige ont été simulés. La bruine verglaçante a plutôt affecté les secteurs aux extrémités de la zone de précipitation à la suite du passage du système. Elle a autant été formée de façon classique (avec une couche de fonte) que nonclassique (sans couche de fonte).

La coupe verticale a permis d'étudier l'évolution des conditions météorologiques le long de la côte est du NB en passant sur Miramichi (figures 4.4 et 4.5). La simulation a confirmé la persistance de l'air chaud à bas niveaux de même que sa grande étendue sur plus de 300 km par moment. Elle a également permis d'observer que les vents en surface provenaient du secteur nord-est et conservaient les températures froides sous la couche d'air chaud. Un fort cisaillement vertical du vent entre la surface et l'inversion de température pouvait également être observé sur la coupe verticale.

Ceci, et la forte advection d'air chaud, correspondent bien à ce qui est attendu dans le cas d'un creux en altitude incliné négativement vers l'ouest.

Pour ce qui est des précipitations, la coupe verticale a fait ressortir que la transition du type suivait la théorie à l'approche d'un front chaud (figures 4.6 à 4.8). Le type passait de la neige au grésil, puis à la pluie verglaçante pour finir en pluie au sud de la coupe. La distribution de la taille des particules glacées a permis de confirmer le grésil diagnostiqué en surface. La fraction de givrage était alors élevée (près de l'unité) et la densité de givrage était de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$. Pour ce qui est des changements dans la distribution de la taille des particules au travers de la couche de fonte, les petites particules glacées étaient plus présentes au-dessus de la couche et leur nombre diminuait vers la surface. Des exceptions ont pu être observées. Les forts mouvements ascendants, liés à l'instabilité barocline au sommet de la couche de fonte et augmentés par la fonte de la neige qui crée un refroidissement diabatique, ont mélangé des gouttelettes d'eau surfondue avec les particules glacées. Des petites particules légèrement givrées se sont alors retrouvées au-dessus de la couche de fonte. De même, l'advection horizontale de petites particules glacées sous la couche de fonte a augmenté leur nombre près de la surface (figures 4.10 et 4.12). Considérant le mélange de pluie verglaçante et de grésil à ce moment, ces petites particules auraient pu interagir avec la pluie verglaçante. Du grésil de type b aurait pu ainsi être créé par gel par contact, réduisant la quantité de pluie verglaçante.

Comme mentionné précédemment, cet événement météorologique a eu des impacts sur les résidents du NB. Énergie NB Power a rapporté des coupures de courant allant jusqu'à 12 jours pour plusieurs de ses clients. Avec les données de la simulation, il a été possible de calculer l'accrétion de glace sur des câbles d'un diamètre de 25 mm. Les modèles d'accrétion de Chaîné et Skeates (1974) et de Jones (1998) ont été utilisés. Bien que le modèle de Chaîné prédit plus d'accumulation de glace que celui

de Jones, les deux modèles ont bien performé pour Miramichi mais n'ont pas su reproduire la forte accumulation rapportée dans la Péninsule acadienne.

Cette étude a tout de même pu mettre en relief les causes de la répartition et de la durée des pannes de courant du NB. Les fortes accumulations de pluie verglaçante correspondent avec les endroits où les pannes les plus longues ont été enregistrées, notamment à Miramichi et la Péninsule acadienne. Les vents à mésoéchelle ont également été analysés en relation avec la distribution des pannes et la configuration du réseau électrique. Les vents moyens les plus forts durant l'événement ont été ressentis dans la Péninsule acadienne, principalement près des côtes. À Miramichi et dans le comté du Kent, les rivières s'écoulant perpendiculairement à la côte ont également subi des effets de canalisation du vent. La simulation montre en effet des vents plus forts le long des rivières. Cet effet, en plus d'un effet d'entonnoir dû à la baie de Miramichi, est surtout visible pour la ville de Miramichi (figure 5.3a). La direction des vents par rapport au réseau électrique semble également avoir joué un rôle. En effet, la ville de Miramichi est construite le long de la rivière Miramichi. Ses rues, et donc son réseau électrique de distribution, sont orientées perpendiculairement à la rivière. Durant cet événement, les vents soufflaient donc avec un angle environnant 90° par rapport au réseau électrique. La charge sur les lignes de courants alourdis par la glace a donc été presque maximisée ce qui peut expliquer en partie la durée plus longue des pannes de courant dans la ville de Miramichi même.

Ce dernier élément met en relief les autres facteurs aggravants déjà discutés qui demeurent des limitations à cette étude. Énergie NB Power (2017) a mentionné dans son rapport que beaucoup d'arbres avaient été en cause dans les pannes de courant pour le comté du Kent, causant parfois des dégâts même après que des réparations ait eu lieu. Or, la simulation ne permet pas de prendre en compte de la présence ou non d'arbres pouvant causer des dégâts. Des branches au-dessus et près des lignes de courant peuvent occasionner des pannes de courant si les branches gelées cassent ;

cependant, la présence de végétation permet de ralentir le vent, qui lui-même pourrait causer le bris d'équipement électrique si la charge de glace était assez importante. C'est d'ailleurs ce qu'il se serait produit dans la Péninsule acadienne. Des accumulations plus importantes de pluie verglaçante, de même que des vents plus forts, ont occasionné les pannes pour cette région. Les données d'observations des pannes de courant ne permettent pas non plus de dire si ce sont surtout des lignes de transmission ou de distributions qui ont été touchées, de même que le commencement et la fin exacte des pannes de courant.

Un autre facteur aggravant est la durée de l'événement. Non seulement les conditions propices aux précipitations verglaçantes ont persisté sur Miramichi et la Péninsule acadienne, apportant des quantités rarement vues de glace sur les structures, mais ces conditions météorologiques ont ralenti le travail de réparation d'Énergie NB Power (2017). La figure 5.5 mettait en évidence que les deux comtés les plus touchés étaient ceux du Northumberland et de Gloucester. Plus on se déplace vers la pointe de la Péninsule acadienne, plus la durée des pannes de courant augmente. Cette relation ne peut pas être ignorée dans l'analyse des résultats.

Pour finir, d'autres sources d'erreurs et limitations sont énumérées ci-bas:

- Dû à la sortie des données chaque heure, le type de précipitation a été diagnostiqué grâce aux données instantanées de température, pression et hauteurs du géopotential. Cependant, les précipitations sont des données cumulées sur l'heure précédente à l'archivage. Le diagnostic ne permet donc pas le mélange de grésil et de neige. La méthode utilisée ne permettait pas non plus de considérer la neige mouillée. Or, selon Énergie NB Power (2017), la neige mouillée aurait contribué à augmenter la charge sur le réseau électrique à certains endroits ;

- Les modèles d'accrétion utilisés sont des modèles simples et faciles à utiliser avec peu de variables. Cependant, les deux modèles supposent une accrétion uniforme de la glace autour du cylindre, une efficacité de collection de 1 des gouttes d'eau surfondues et ne prennent pas en compte les gouttelettes de nuages. De même, la constante K du modèle de Chaîné a une dépendance envers la température. Cette température a été approximée à près de 0 °C pour cette analyse ;
- Le schéma microphysique P3 permet de mieux suivre l'évolution des particules glacées, en se basant sur l'évolution de ses caractéristiques plutôt que sur une définition rigide. Cependant, les processus impliquant une particule en phase mixte n'étaient pas intégrés lors de la simulation. Une fraction liquide (Cholette et al. 2019) a depuis été ajoutée au schéma et pourrait permettre d'améliorer les processus dans la couche de fonte.

6.2 Conclusion

Dans un contexte des changements climatiques, il est impératif de mieux comprendre les événements extrêmes qui se produisent. La tempête du 24 au 27 janvier 2017, qui représente la plus grande opération de rétablissement d'électricité pour Énergie NB Power (2017), en est un exemple récent pour le NB. Cette étude avait pour but d'analyser les conditions météorologiques ayant mené à la sévérité de la tempête.

Les conclusions suivantes en découlent:

- La durée des précipitations due au déplacement lent de la dépression a amené des quantités importantes de précipitations sur le NB ;
- L'inclinaison négative du creux en altitude a favorisé l'advection d'air chaud en avant de la dépression. De forts mouvements verticaux, augmentés par la

fonte de la neige au sommet de la couche de fonte, ont donné de fortes quantités de précipitations ;

- La persistance et l'étendue de la couche de fonte à bas niveau ont permis une forte accumulation de précipitations verglaçantes sur la côte est du NB ;
- Les vents forts et chargés en humidité en provenance du Golfe du Saint-Laurent ont augmenté l'accrétion de glace sur les structures, en plus d'augmenter la charge sur le réseau électrique ;
- Les forts vents soufflant perpendiculairement aux lignes électriques à Miramichi ont augmenté le risque de pannes de courant sur la ville. La canalisation et l'effet d'entonnoir des vents dans la Baie et la rivière Miramichi ont contribué à augmenter la force de ces vents.

Ces facteurs météorologiques sont en cause dans l'ampleur de la crise. Ils ont joué un rôle dans la quantité rarement vue de glace accumulée sur les installations électriques de même que la charge à laquelle elles ont été soumises. Ces facteurs ont été aggravés par l'éloignement géographique des régions affectées, plus particulièrement dans le cas de la Péninsule acadienne, de même que la persistance des mauvaises conditions météorologiques, ce qui a ralenti les travaux de rétablissement du courant d'Énergie NB Power.

Cette étude ne représente qu'un seul événement extrême de précipitations verglaçantes ayant affecté le NB. Il est difficile de dire quel élément aggravant a eu le plus d'impact sur la sévérité de la tempête. Des travaux futurs pourraient étudier d'autres événements avec des précipitations verglaçantes qui ont causé des dégâts au réseau électrique et comparer les résultats à cette tempête. L'ajout de la neige mouillée et des précipitations semi-liquides dans les simulations pourrait également permettre de mieux prédire l'accumulation de glace sur le réseau électrique. De plus, une étude plus approfondie de la relation entre l'accumulation de glace et l'angle des

vents par rapport aux réseaux de transmission et de distribution serait utile. Les données obtenues dans cette étude ont permis de se faire une idée globale de l'impact du vent mais n'ont pas permis d'attribuer les pannes de courant à cette seule cause. Par le fait même, une meilleure compréhension de la climatologie des vents locaux pourrait aider les municipalités dans leur planification urbaine à faire face à d'éventuels événements extrêmes de précipitations verglaçantes.

Pour finir, les tempêtes avec des précipitations mixtes peuvent représenter un défi prévisionnel, puisque les changements de phase affectent le profil de température et la stabilité de l'atmosphère. Cette étude a permis de faire ressortir les facteurs importants de la tempête du 24 au 27 janvier 2017. Des aspects synoptiques, locaux et à microéchelle de la tempête ont été abordés, et les conclusions montrent que chacun de ces aspects a eu un impact sur la sévérité de l'événement.

ANNEXE A

ÉVOLUTION TEMPORELLE DU TYPE DE PRÉCIPITATION SUR LES MARITIMES

Cette annexe regroupe quelques figures montrant l'évolution temporelle des précipitations en fonction du type durant l'événement. De cette façon, il est plus aisé pour le lecteur de visualiser les zones de transition des différents types de précipitations. Ces figures font, de plus, ressortir la durée des précipitations verglaçantes au-dessus de Miramichi et de la Péninsule acadienne.

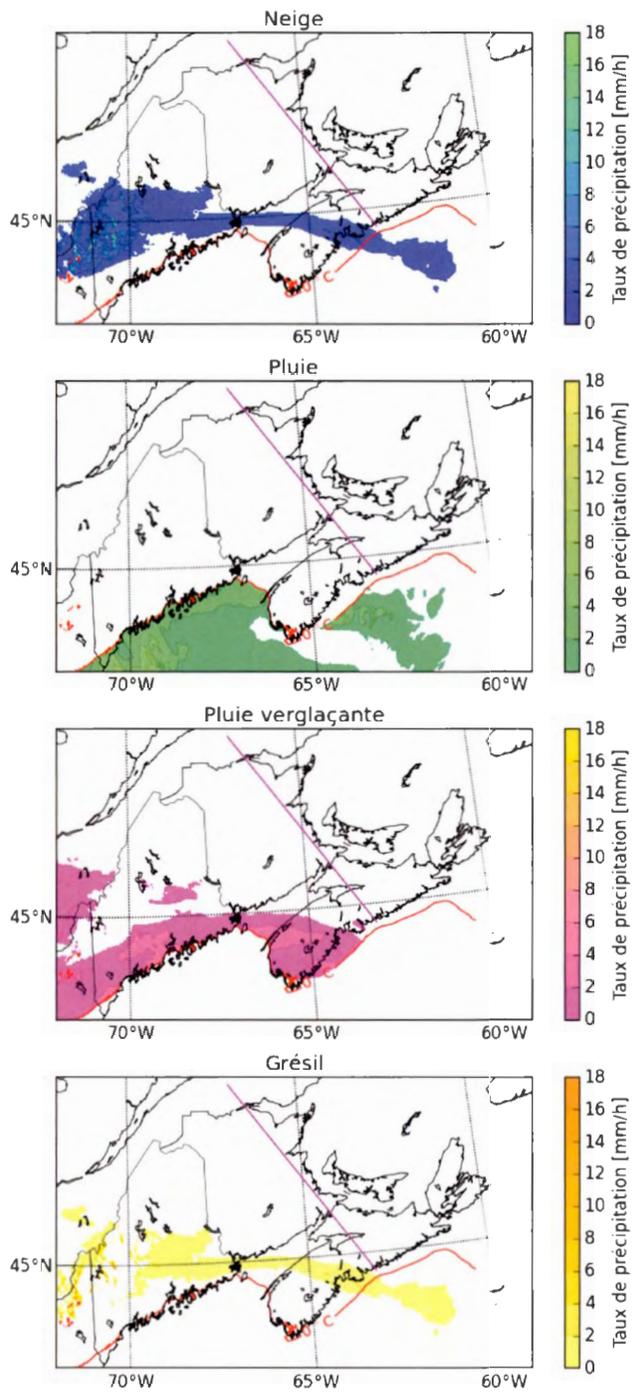


Figure A.1 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 24 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

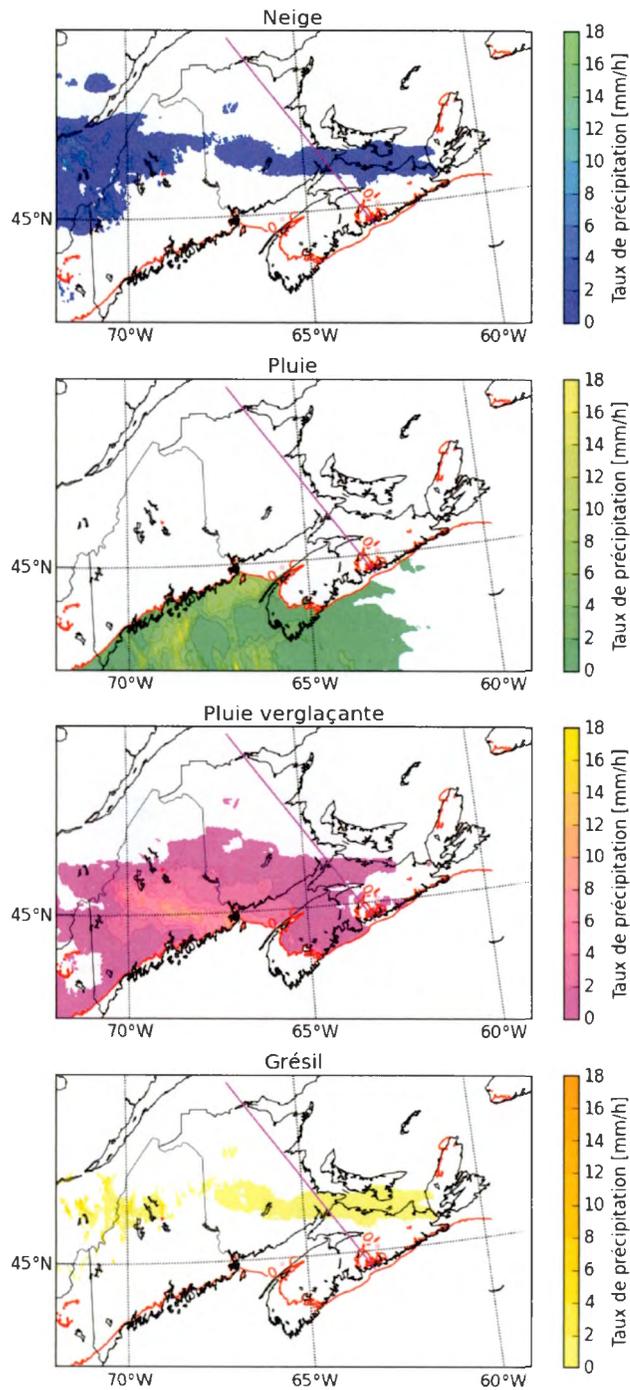


Figure A.2 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1800 UTC le 24 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

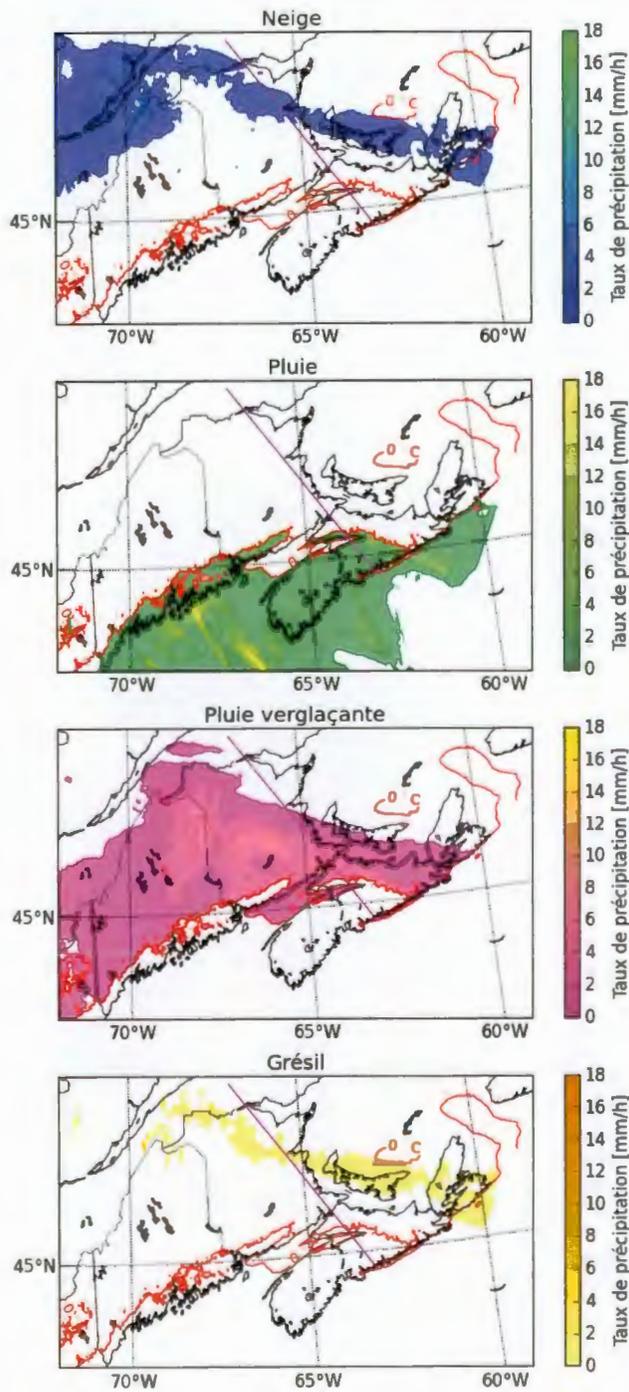


Figure A.3 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0000 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

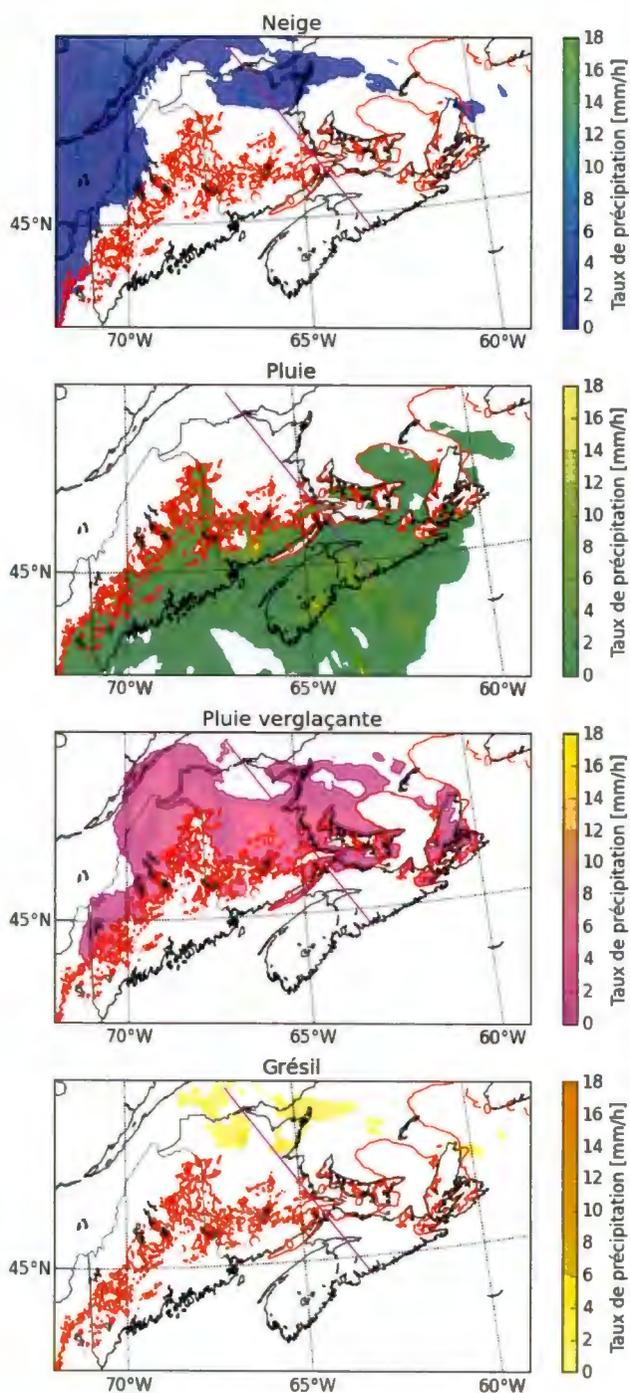


Figure A.4 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0600 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

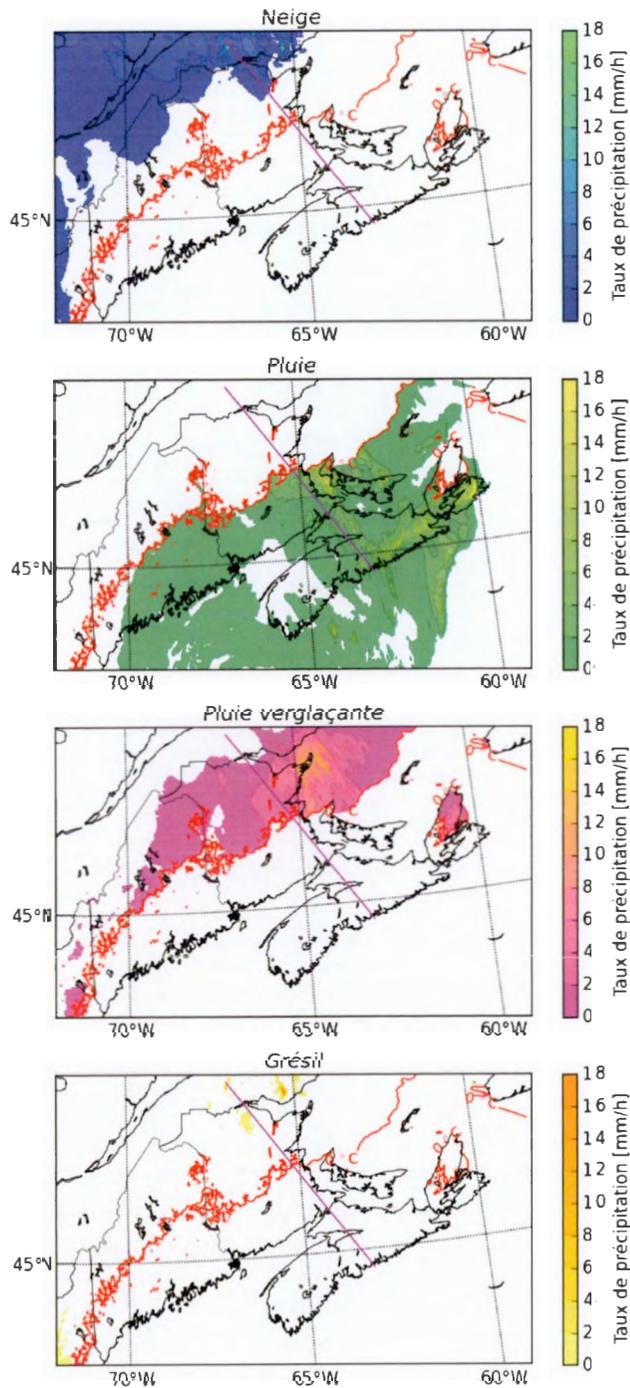


Figure A.5 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

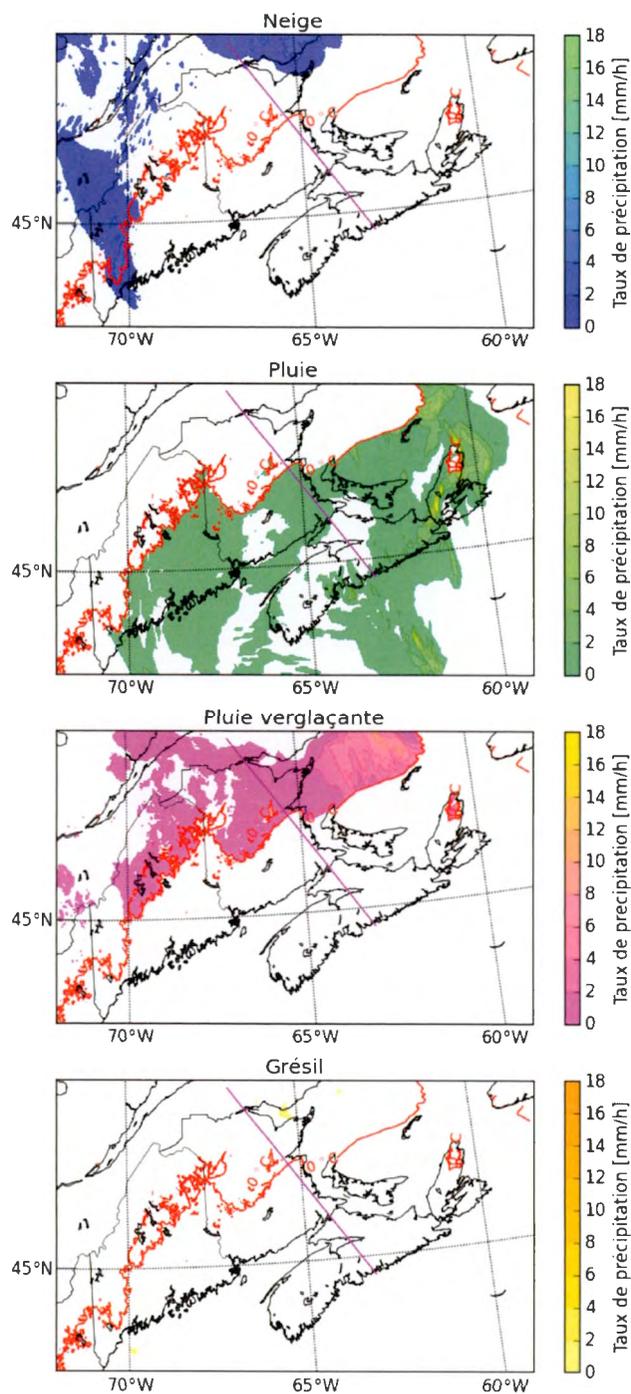


Figure A.6 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1800 UTC le 25 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

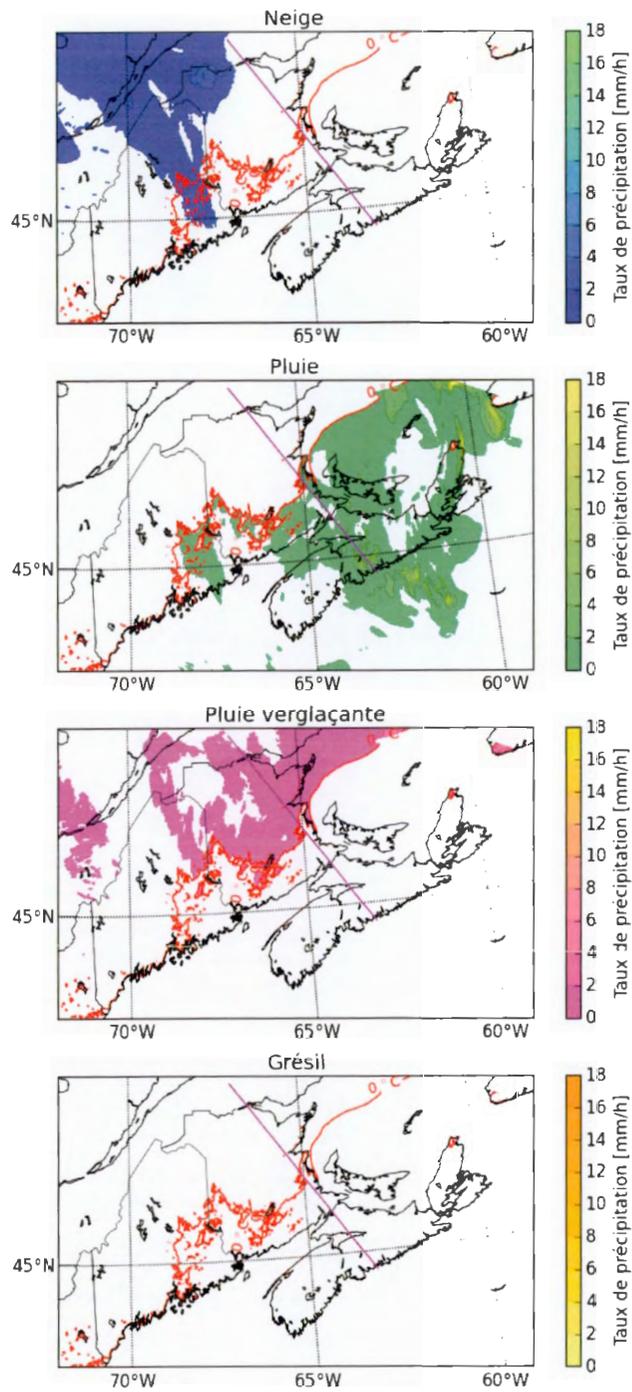


Figure A.7 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0000 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

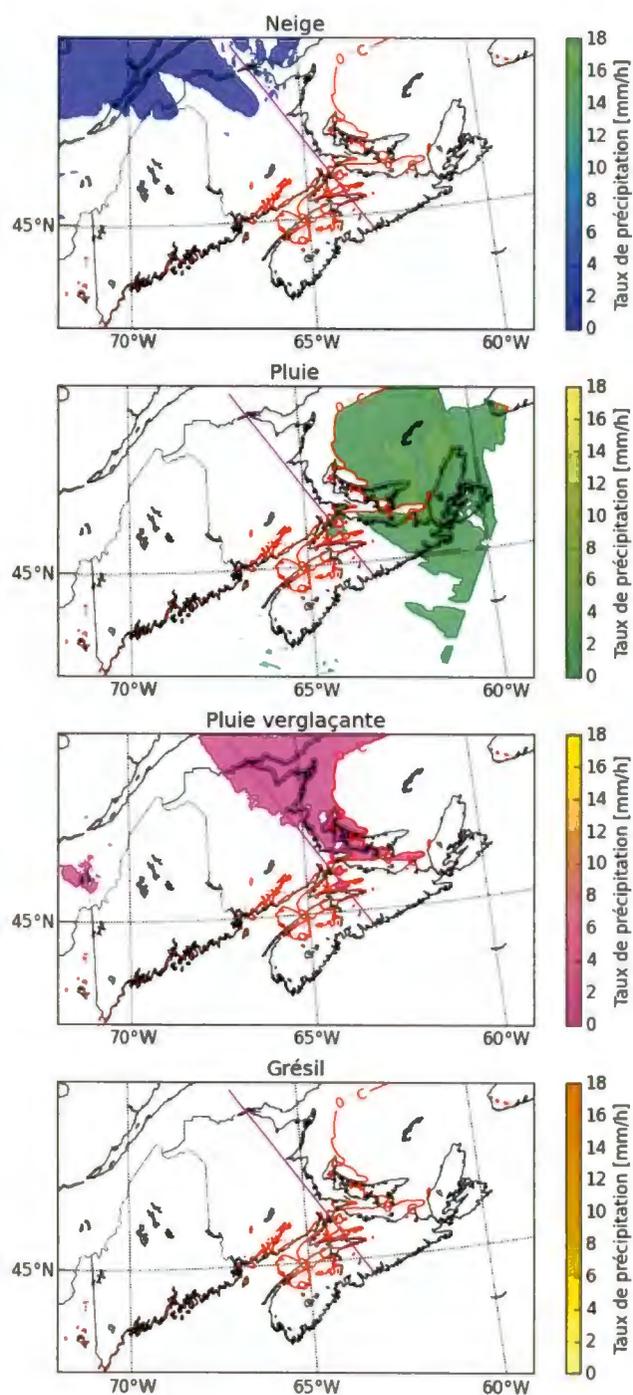


Figure A.8 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 0600 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

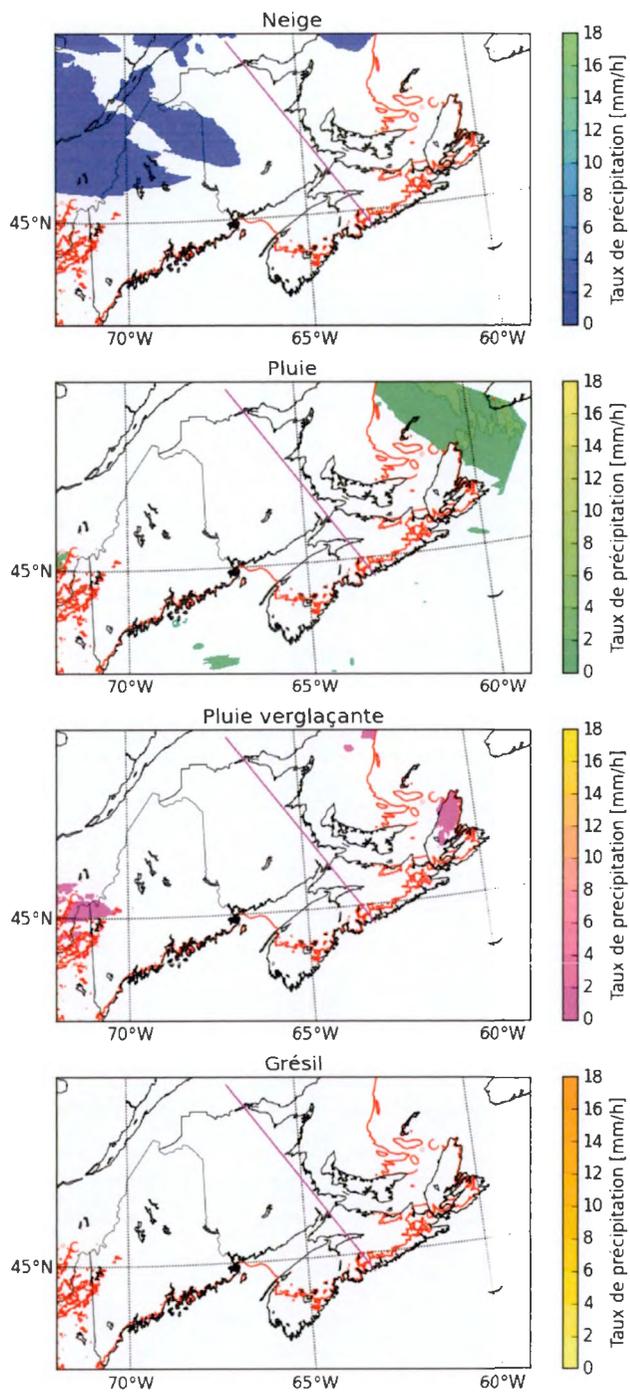


Figure A.9 Carte du taux de précipitation horaire pour les différents types de précipitations à 1200 UTC le 26 janvier. La ligne transversale magenta est la position de la coupe verticale. La ligne rouge est l'isotherme de 0°C à la surface.

ANNEXE B

ANALYSE DU COUVERT DE GLACE DU SERVICE CANADIEN DES GLACES DURANT LA TEMPÊTE

Comme mentionné dans le chapitre IV, le couvert de glace dans le golfe du Saint-Laurent, de même que dans le détroit du Northumberland, a pu jouer un rôle dans la quantité d'humidité disponible le long de la côte durant la tempête. Les cartes qui suivent proviennent du Service canadien des glaces d'ECCC.

Sur la figure B1, il est possible de voir que, pour le 24 janvier, une mince bande de glace se trouvait le long de la côte est du NB et dans le détroit. Le golfe restait néanmoins plutôt libre de glace, ce qui aurait pu aider à augmenter l'humidité de l'air provenant du golfe. La figure B2 montre l'analyse faite le 25 janvier alors que le système affecte déjà le NB depuis une journée. L'air relativement chaud entraîné à l'avant de la dépression, propice à la formation de la couche de fonte en altitude, a également fait fondre en partie le couvert de glace le long de la côte. En bref, la situation du couvert de glace et son évolution ont possiblement permis de fournir de l'humidité au système dépressionnaire, tout particulièrement sur Miramichi et la Péninsule acadienne, qui ont été longuement touchés par les précipitations verglaçantes.

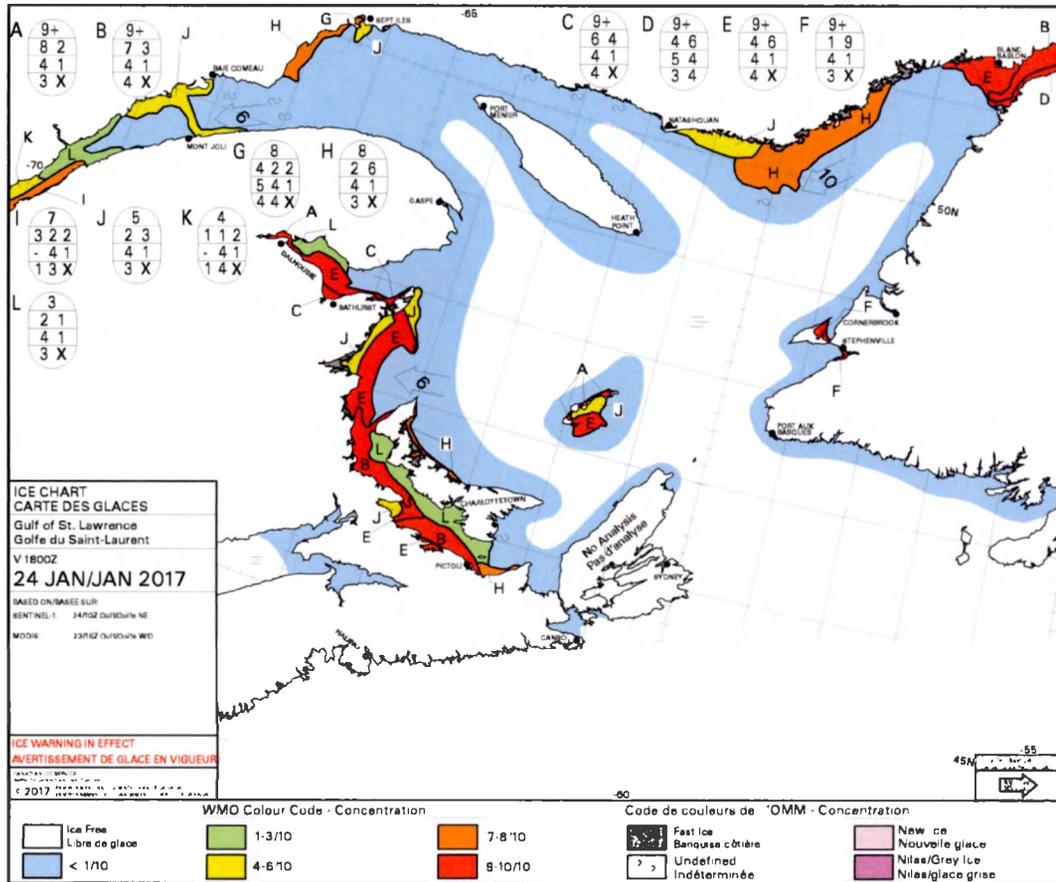


Figure B.10 Analyse du couvert de glace par le Service canadien des glaces pour le 24 janvier 2017. Récupéré de <https://icweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=fr>.

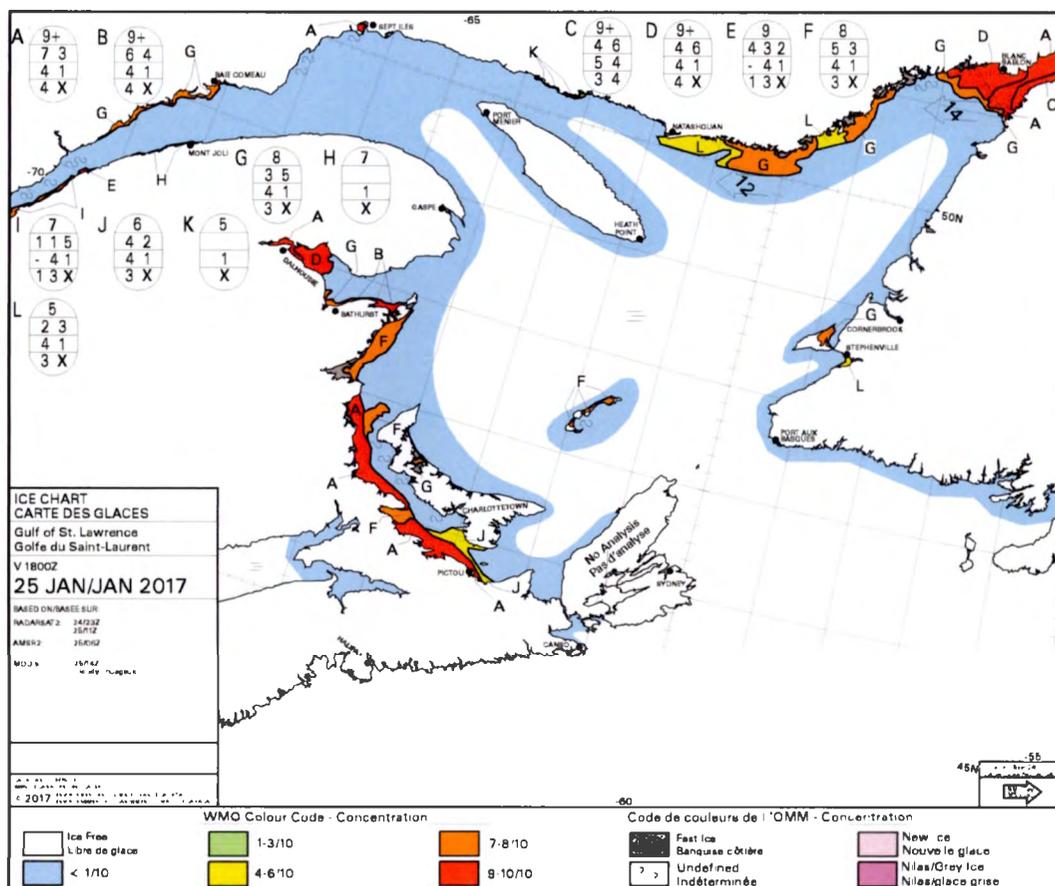


Figure B.11 Analyse du couvert de glace par le Service canadien des glaces pour le 24 janvier 2017. Récupéré de <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=fr>.



RÉFÉRENCES

- AMS (2019). *Glossary of Meteorology*. Récupéré de [<http://glossary.ametsoc.org>]
- Barth, M. C. and Parsons, D. B. (1996). Microphysical processes associated with intense frontal rainbands and the effect of evaporation and melting on frontal dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 53(11), 1569-1586. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<1569:MPAWIF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<1569:MPAWIF>2.0.CO;2)
- Barzcz A., Milbrandt, J.A. et Thériault, J.M. (2018). Improving the Explicit Prediction of Freezing Rain in a Kilometer-Scale Numerical Weather Prediction Model. *Wea. Forecasting*, 33, 767–782, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0136.1>
- Bernstein, B.C. (2000). Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events. *Wea. Forecasting*, 15, 485–508, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015<0485:RALIOF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0485:RALIOF>2.0.CO;2)
- Best, A.C. (1949). The size distribution of raindrops. *Q. J. Royal Met. Soc.*, 75, 16–36.
- Carmichael, H., Stewart, R.E., Henson, W. et Theriault, J.M. (2011). Environmental conditions favoring ice pellet aggregation. *Atmos. Res.*, 101, 844–851, doi:10.1016/j.atmosres.2011.05.015.
- Carrière, J., Lainard, C., Le Bot, C., et Robart, F. (2000). A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteorological Applications*, 7(3), 229-238.
- Chaîné P.M. et Skeates, P. (1974). Wind and Ice Loading Criteria Selection : Industrial Meteorology - Study 3. Toronto: Environment Canada, 14 p.
- Chaîné P.M., Castonguay, G. et Canada. Atmospheric Environment Service. (1974). New Approach to Radial Ice Thickness Concept Applied to Bundle-Like Conductors. Industrial Meteorological, Study 4. Toronto: Environment Canada, Atmospheric Environment, 11 p.
- Cheng, C. S., Li, G., et Auld, H. (2011). Possible impacts of climate change on freezing rain using downscaled future climate scenarios: Updated for eastern Canada. *Atmos.–Ocean*, 49(1), 8–21, doi:10.1080/07055900.2011.555728.

- Cheng, C. S., Lopes, E., Fu, C., et Huang, Z. (2014). Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: Updated for Canada. *Journal of Climate*, 27(3), 1255–1270.
- Cholette, M., Morrison, H., Milbrandt, J.A. et Thériault, J.M. (2019). Parameterization of the Bulk Liquid Fraction on Mixed-Phase Particles in the Predicted Particle Properties (P3) Scheme: Description and Idealized Simulations. *J. Atmos. Sci.*, 76, 561–582, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0278.1>
- Cortinas Jr., J.V., Bernstein, B.C., Robbins, C.C. et Walter Strapp, J. (2004). An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976–90. *Wea. Forecasting*, 19, 377–390, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0377:AAOFRF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0377:AAOFRF>2.0.CO;2)
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M. et Staniforth, A. (1998). The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1373–1395, doi:10.1175/1520-0493(1998)126,1373:TOCMGE.2.0.CO;2.
- Czys, R.R., Scott, R.W., Tang, K.C., Przybylinski, R.W. et Sabones, M.E. (1996). A Physically Based, Nondimensional Parameter for Discriminating between Locations of Freezing Rain and Ice Pellets. *Wea. Forecasting*, 11, 591–598, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0591:APBNPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0591:APBNPF>2.0.CO;2)
- Énergie NB Power (2017). *Tempête de verglas 2017. Leçons retenues*. Tiré de Wagner et Nouveau-Brunswick (2017). Récupéré de https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/corporate/promo/analyse_tempetedeverglas.html
- Farzaneh, M. (éd.). (2008). Atmospheric icing of power networks. Springer Science & Business Media.
- Field, P.R., Lawson, R.P., Brown, P.R., Lloyd, G., Westbrook, C., Moisseev, D., ... Sullivan, S. (2017). Secondary Ice Production: Current State of the Science and Recommendations for the Future. *Meteorological Monographs*, 58, 7.1–7.20, <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0014.1>
- Geresdi, I. (1998). Idealized simulation of the Colorado hailstorm case : comparison of bulk and detailed microphysics. *Atmos. Res.*, 45(4), 237-252. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(97\)00079-3](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00079-3)
- Gibson, S., et Stewart, R. E. (2007). Observations of ice pellets during a winter storm. *Atmos. Res.*, 85, 64–76, doi:10.1016/j.atmosres.2006.11.004.

- Gibson, S., Stewart, R.E. et Henson, W. (2009). On the variation of ice pellet characteristics. *J. Geophys. Res.*, 114, D09207, doi:10.1029/2008JD011260.
- Goodwin, E.J., III, Mozer, J.D., Di Gioia, A.M., Jr., Power, B.A., (1983). Predicting ice and snow loads for transmission lines. *Colloque : «First International Workshop on Atmospheric Icing on Structures»*, CRREL Special Report 83-17. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, p. 267–273.
- Groisman, P.Y., Bulygina, O.N., Yin, X., Vose, R.S., Gulev, S.K., Hanssen-Bauer, I. et Førland, E. (2016). Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environ. Res. Lett.* 11 <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045007>.
- Haby, J., s.d. What is a “Negatively tilted trough”? Récupéré le 27 juin 2018 de [<http://www.theweatherprediction.com/habyhints/127/>]
- Hamel, F. (1996). *Saguenay, été 1996*, Trustar Montréal, 206 p.
- Jeong, D.I., et Sushama, L. (2018). Projected changes to extreme wind and snow environmental loads for buildings and infrastructure across Canada. *Sustainable Cities and Society*, 36, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.004>
- Jeong, D.I., Sushama, L., Vieira, M.J.F. et Koenig, K.A. (2018). Projected changes to extreme ice loads for overhead transmission lines across Canada. *Sustainable Cities and Society*, 39, 639–649. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.017>
- Jones, K.F. (1998). A simple model for freezing rain ice loads. *Atmospheric Research*. 46(1). 87-97. 10.1016/S0169-8095(97)00053-7.
- Kessler, E., (1969). *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmosphere Circulations*. Meteor. Monogr., No 32, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.
- Khain, A. P., Beheng, K.D., Heymsfield, A., Korolev, A., Krichak, S.O., Levin, Z., ... Yano, J.-I. (2015), Representation of microphysical processes in cloudresolving models: Spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization, *Rev. Geophys.*, 53, 247–322, doi:10.1002/2014RG000468.
- Kolomeychuk, R.J., McKay, D.C. et Iribarne, J.V. (1975). The Fragmentation and Electrification of Freezing Drops. *J. Atmos. Sci.*, 32, 974–979, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0974:TFAEOF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0974:TFAEOF>2.0.CO;2)
- Lambert, S.J. et Hansen, B.K. (2011). Simulated Changes in the Freezing Rain Climatology of North America under Global Warming Using a Coupled Climate Model, *Atmosphere-Ocean*, 49(3), 289-295, DOI:10.1080/07055900.2011.607492.

- Lamraoui, F., Fortin, G., Benoit, R., Perron, J. et Masson, C. (2013). Atmospheric icing severity: Quantification and mapping. *Atmos. Res.*, 128, 57-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.03.005>
- Liu, A., Mooney, C., Szeto, K., Thériault, J.M., Kochtubajda, B., Stewart, R.E., ... Pomeroy, J. (2016). The June 2013 Alberta catastrophic flooding event: Part 1—Climatological aspects and hydrometeorological features. *Hydrol. Processes*, 30, 4899–4916, doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.10906>.
- Lu, M.L. et Kieloch, P. (2005). A Novel Approach to the Combined Ice and Wind. *Colloque : IW AIS XI, Montréal, Juin 2005*. Canada
- Makkonen, L. (1984). Modeling of ice accretion on wires. *J. Climate Appl. Meteor.* 23, 929–939.
- Makkonen, L. (1998). Modeling power line icing in freezing precipitation. *Atmos. Res.*, 46, 131-142.
- Makkonen, L., Lehtonen, P. et Hirviniemi, M. (2014). Determining ice loads for tower structure design. *Engineering Structures*, 74, 229-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.034>.
- Marshall, J.S. et Palmer, W. (1948). Relation of raindrop size to intensity. *J. Meteorol.* 5, 165–166.
- McKay, G.A. et Thompson, H.A. (1969). Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data. *J. Appl. Meteorol.*, 8, 927-935.
- Milbrandt, J.A. et Yau, M.K. (2005). A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3065–3081, <https://doi.org/10.1175/JAS3535.1>.
- Milbrandt, J.A., Bélair, S., Faucher, M., Vallée, M., Carrera, M.L. et Glazer, A. (2016). The Pan-Canadian High Resolution (2.5 km) Deterministic Prediction System. *Wea. Forecasting*, 31, 1791–1816, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0035.1>.
- Milton, J., Bourque, A. et Canada. Environnement Canada. Région Du Québec. Division Des Sciences Atmosphériques Et Enjeux Environnementaux. Compte-rendu Climatologique De La Tempête De Verglas De Janvier 1998 Au Québec Rapport Scientifique. Série Sur Les Extrêmes Climatiques Au Québec Q98-01. Ottawa: Environnement Canada, 1999.
- Morris, R. (2017). *Estimated Ice Accretion Amounts on Electrical Conductors in the January 24-26, 2017 Northeastern NB Icing Event* [Document non publié].

- Morrison, H. et Milbrandt, J.A. (2015). Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests. *J. Atmos. Sci.*, 72, 287–311, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0065.1>
- NB. Ministère Ressources naturelles et Développement de l'énergie. (2005). *Comtés*. Récupéré de la base de données GeoNB <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/county.asp>.
- NB. Ministère de l'Environnement et Gouvernements locaux. (2019). *Zones municipales*. Récupéré de la base de données GeoNB <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/MunAreas.asp>.
- NOAA. Storm Prediction Center (2019). *Surface and Upper Air Maps*. Disponible en ligne à [<https://www.spc.noaa.gov/obswx/maps/>].
- NOAA, Weather Prediction Center (2019). WPC's Surface Analysis Archive. Disponible en ligne à [https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php].
- OMM (2017). *International Cloud Atlas*. Récupéré de [<https://cloudatlas.wmo.int/home.html>].
- Panteli, M. et Mancarella, P. (2015). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 127, 259–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eprsr.2015.06.012>
- Poirier, Émilie. (2017). *Étude de la ligne pluie-neige dans la vallée de Kananaskis, Alberta* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal. Récupéré de [<http://archipel.uqam.ca/9852/1/M15002.pdf>].
- Poots, G. (1996). *Ice and snow accretion on structures*. Taunton, Angleterre: Research Studies Press; New York, Toronto: J. Wiley, 338 p.
- Pruppacher, H.R. and Klett, J.D. (1997). *Microphysics of clouds and precipitation* (2e éd.). Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers, 954 p.
- Rauber, R.M., Olthoff, L.S., Ramamurthy, M.K. et Kunkel, K.E. (2000). The Relative Importance of Warm Rain and Melting Processes in Freezing Precipitation Events. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1185–1195, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1185:TRIORW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1185:TRIORW>2.0.CO;2)

- Reeves, H.D., Ryzhkov, A.V. et Krause, J.(2016). Discrimination between Winter Precipitation Types Based on Spectral-Bin Microphysical Modeling. *J. Appl. Meteor.*, 55, 1747-1761. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0044.1
- Ressources naturelles Canada (RNCAN). Secteur de la politique stratégique et des résultats. Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre. (2017-). *Base de données toponymiques du Canada* [Base de données]. Récupéré de <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/e27c6eba-3c5d-4051-9db2-082dc6411c2c> .
- Rezaei, S.N., Chouinard, L., Langlois, S. et Légeron, F.(2016). Analysis of the effect of climate change on the reliability of overhead transmission lines. *Sustainable Cities and Society*, 27, 137-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.007>
- Ryzhkov, A., Reeves, H., Krause, J. et Burcham, H. (2014). Discrimination Between Winter Precipitation Types Based on Explicit Microphysical Modeling of Melting and Refreezing in the Polarimetric Hydrometeor Classification Algorithm. *Colloque : Eighth European Conf. on Radar Meteorology, Garmisch-Partenkirchen, Germany, European Meteorological Society, MIC.P07*. [Disponible en ligne à http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/198_Ryzhkov.pdf.]
- Stallabrass, J.R. et Hearty, P.F. (1967). The icing of cylinders in conditions of simulated freezing sea spray. *Mechanical Engineering Report MD-50, NRC 9782*. National Research Council of Canada, Ottawa.
- Stewart R.E., Thériault, J.M. et Henson, W. (2015). On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0°C. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 623–639, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00032.1>
- Stewart, R.E. et Crawford, R.W. (1995). Some characteristics of the precipitation formed within winter storms over eastern Newfoundland. *Atmos. Res.*, 36, 17–37, doi:10.1016/0169-8095(94)00004-W.
- Stewart, R.E., Marwitz, J.D., Pace, J. C. et Carbone, R.E.(1984). Characteristics through the Melting Layer of Stratiform Clouds. *J. Atmos. Sci.*, 41, 3227–3237, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<3227:CTTMLO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<3227:CTTMLO>2.0.CO;2)
- Straka, J.M. (2011). *Cloud and precipitation microphysics: principles and parameterizations* (1ère éd. pbk). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 392 p.
- Strapp, J. W., Stuart, R. A. et Isaac, G. A. (1996). A Canadian climatology of freezing precipitation, and a detailed study using data from St. John's, Newfoundland. Colloque : FAA International Conference On Aircraft In-flight Icing, Springfield, Virginia, 6–8 mai 1996.

- Stuart, R.A. et Isaac, G.A. (1999). Freezing precipitation in Canada, *Atmosphere-Ocean*, 37(1), 87-102, DOI: 10.1080/07055900.1999.9649622
- Takahashi, C. (1975). Deformations of frozen water drops and their frequencies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 53(6), 402-411. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.53.6_402.
- Thériault, J.M., Hung, I., Vaquer, P., Stewart, R.E., et Pomeroy, J.W. (2018). Precipitation characteristics and associated weather conditions on the eastern slopes of the Canadian Rockies during March–April 2015, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4491-4512, <https://doi.org/10.5194/hess-22-4491-2018>, 2018.
- Thériault, J.M., Rasmussen, R., Petro, E., Trépanier, J.-Y., Colli, M. et Lanza, L.G. (2015). Impact of Wind Direction, Wind Speed, and Particle Characteristics on the Collection Efficiency of the Double Fence Intercomparison Reference. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54, 1918–1930, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0034.1>
- Thériault, J.M., Stewart, R.E. et Henson, W. (2010). On the Dependence of Winter Precipitation Types on Temperature, Precipitation Rate, and Associated Features. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 1429–1442, <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2321.1>
- Thériault, J.M., Stewart, R.E., Milbrandt, J.A. et Yau, M.K. (2006). On the simulation of winter precipitation types. *J. Geophys. Res.*, 111, D18202, doi:10.1029/2005JD006665.
- Thériault, J.M. et Stewart, R.E. (2010). A Parameterization of the Microphysical Processes Forming Many Types of Winter Precipitation. *J. Atmos. Sci.*, 67, 1492–1508, <https://doi.org/10.1175/2009JAS3224.1>
- Thériault, J. M. and Stewart, R. E. (2007). On the effects of vertical air velocity on winter precipitation types, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 231-242, <https://doi.org/10.5194/nhess-7-231-2007>.
- Thompson, G., Rasmussen, R.M. et Manning, K. (2004). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 519–542, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2)
- Wagner, J. et Nouveau-Brunswick. (Août 2017). *Analyse de la tempête de verglas Nouveau-Brunswick, janvier 2017*. Fredericton, NB : Nouveau-Brunswick. Récupéré de https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/corporate/promo/analyse_tempetedeverglas.html.
- Yip, T.-C.(1995). Estimating icing amounts caused by freezing precipitation in Canada. *Atmos. Res.*, 36(3-4), 221-232. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00037-E](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00037-E)

Zerr, R.J. (1997). Freezing Rain: An Observational and Theoretical Study. *J. Appl. Meteor.*,
36, 1647–1661, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1647:FRAOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1647:FRAOAT>2.0.CO;2)